

공학석사 학위논문

바다모래와 부순모래를 혼입한
수중불분리성 콘크리트의 특성 연구

지도교수 김 명 식

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함



2002년 2월

부경대학교 대학원

토목공학과

박세인

박세인의 공학석사 학위논문을 인준함

2001년 12월 26일

주 심 공학박사 이 환 우



위 원 공학박사 이 영 대



위 원 공학박사 김 명 식



목 차

Abstract	i
1. 서론	1
1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 연구범위 및 방법	3
2. 문헌 고찰	5
2.1 수중불분리성 혼화제와 유동화제	5
2.2 수중불분리성 콘크리트의 국내 연구 동향	8
2.3 해수	10
2.4 부순모래	12
2.4.1 부순모래에 사용되는 암석	12
2.4.2 부순모래에 사용되는 원석의 성질	13
3. 실험계획 및 방법	18
3.1 실험파라미터	18
3.2 실험방법	19
3.2.1 수중불분리성 콘크리트의 제작	19
3.2.2 압축강도측정용 공시체제작 및 양생	19
3.2.3 굳지않은 콘크리트시험	20
3.2.4 경화된 콘크리트시험	21
3.3 사용재료	21
3.3.1 시멘트	21
3.3.2 골재	22
3.3.3 혼화재료	22
3.3.4 실험수	23
3.4 배합설계	23

4. 실험결과 및 고찰	25
4.1 굳지않은 수중불분리성콘크리트의 특성	25
4.1.1 재료분리저항성	27
4.1.2 유동성	28
4.1.3 공기량	29
4.2 경화된 수중불분리성 콘크리트의 특성	30
4.2.1 단위중량	33
4.2.2 압축강도	34
4.3 실험조건에 따른 비교, 검토	36
4.4 제작·양생조건이 수중불분리성콘크리트에 미치는 영향	42
5. 결 론	44
참 고 문 헌	47

**Study on the Characteristics of Antiwashout Underwater Concrete
with variation of Blend Ratio of Sea Sand and Crushed Sand**

Se-in, Park

*Department of Civil Engineering
Graduate School Pukyong National University*

Abstract

Recently as the development of a large-scale ocean structure or ocean is in progress, the importance of underwater concrete construction came to the fore.

When concrete is placed underwater, it is diluted with separating cementitious material and as a result the quality of concrete becomes poor. For solve the problem, antiwashout underwater concrete is increasingly used for the construction and repair of the concrete

In this study, sea sand is blended with river sand and crushed sand is blended with river sand and sea sand, to investigate the quality change and characteristics of antiwashout underwater concrete with variation of blend ratio of sea sand and crushed sand(0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%).

To see experiment conclusion of fresh concrete, material segregation resistance(pH, suspension) and flowability and air contents is all satisfied with mix design standard value and KSCE(Korea Society of Civil Engineering) standard value.

To see experiment conclusion of fresh concrete, the more blend ratio of crushed sand increases, the more unit weight increases. Because the for that specific gravity of crushed sand is higher comparatively than that of river sand

and sea sand. Higher compressive strength is measured following the order of river sand, crushed sand, sea sand regardless of age and casting-curing condition. Except for case of using river sand, blend ratio of 40% is appeared on most compressive strength . To follow, the optimum blend ratio of sea sand and crushed sand is 40% from the view point of compressive strength.

The incremental modulus at mix proportion design and unit weight of antiwashout underwater agent were increased more than fresh water, when the antiwashout underwater concrete is made use of underwater work from ocean

Key words : antiwashout underwater concrete, River sand, Sea sand, Crushed sand, blend ratio, material segregation resitance, flowability, KSCE, casting and curing condition, incremental modulus

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

근래에 들어 선진국들을 중심으로 해양에 대한 관심과 개발로 인하여 수중 콘크리트구조물의 수요가 급증하고 있고, 우리나라는 삼면이 바다로 둘러 싸여 있고, 인구에 비해 국토면적이 좁은 특수한 상황에 놓여 있어서 하천, 해안매립에 의한 영토확장이나 해상도시, 해상공항, 도서를 있는 교량 및 항만 건설 등과 같은 해양개발의 필요성은 매우 중요하다. 그런데 이러한 해양개발 시설들을 건설하기 위해서는 수중콘크리트공사가 필수적이며, 수요 역시 증가할 것으로 예상된다.

보통 콘크리트는 강도와 내구성이 큰 특성을 가지며 경제적인 재료로 널리 사용되고 있다. 해양에 콘크리트를 치게되면 시공상의 여러 가지 제약과 품질 검사의 어려움이 따르고 해양의 기상작용과 물리, 화학적 작용을 받게되므로 육상시공과는 달리 콘크리트의 품질이 변화되고 강도와 내구성이 저하되기 쉽다.

따라서 수중콘크리트 시공방법으로는 육상에서와 같이 배합설계한 콘크리트가 물에 의한 씻김작용이 최소화 되도록 트레미, 밀열림상자나 밀열림포대를 고안하였으나 그 후 시공장비의 개발로 버킷(Bucket), 호퍼(Hopper), 펌프(Pumper)등이 사용되어져 왔다.

중래에 개발되어 현재까지 사용되는 대표적인 공법으로는 노르웨이에서 1881년 처음 개발되어 몇 차례의 개량을 거친 후 1912년에 미국에서 특허로 등록된 트레미공법이 있다. 이 공법은 그 이후 더욱 더 개량되어 콘크리트를 대량으로 칠 수 있도록 다양한 방법으로 개발되었으며, 펌프에 의한 방법보다 저 수심에 적합한 공법으로 현재 가장 많이 채택되는 공법 중 하나이다. 또한 1930년 미국에서는 특수콘크리트공법으로 프리팩트콘크리트공법도 개발되었다. 이러한 공법들은 주로 수중에서 콘크리트의 재료분리를 방지하기 위해 콘크리트나 모르타가 물과 접촉하는 것을 최소화하는 것이 주안점이었으나, 이러한 시공방법의 개선만으로는 수중에서 물의 씻김작용에 의해 시멘트

가 유실되어 콘크리트의 품질이 불균일 하게 되고 강도와 수밀성이 저하되는 등의 문제점들은 피할 수는 없었다. 하지만 1974년에 서독에서 수중불분리성 혼화제를 개발하게 되어 이러한 문제점들을 해소 할 수 있는 계기가 되었다.

우리나라는 1984년경 수중불분리성 콘크리트에 대한 기술도입을 시도하였으며, 최근까지 활발한 연구가 지속되어온 분야는 혼화제의 사용량에 따른 유동성, 슬럼프 경시변화, 충전성, 재료분리의 저항성, 응결특성 등 굳지 않은 콘크리트의 물성에 관한 것과 압축강도 및 탄성계수, 수중과 기중에서 제작한 공시체의 압축강도의 비, 담수와 해수중에서 제작한 공시체의 비 등에 관한 연구가 주로 이루어지고 있다. 해양환경에 적용하기 위한 연구는 해수 중에 건설되는 교량의 대규모 기초공사에 적용하기 위한 콘크리트의 배합과 시공 특성상 요구되는 제반성질에 관해 주로 이루어져 왔다. 이러한 연구가 최근까지 활발히 진행된 결과 수중콘크리트공사에 있어서의 시멘트가 유실되는 재료 분리문제와 다짐 없이 타설되는 수중콘크리트의 수밀성과 내구성에 대한 신뢰성 확보문제 등의 문제점들을 보완하여 품질을 향상시켰다. 그래서 최근들어 수중불분리성 콘크리트는 광안대교, 영종대교, 삼천포-창선연육교, 당산철교 보강공사, 청평 및 팔당댐의 도수로, 항만청의 등대공사 등 해양 및 담수중 콘크리트 구조물의 신설, 보수 및 보강 현장에 사용되는 사례가 증가하고 있는 추세이다.

또한 항만콘크리트 구조물의 성능과 경제성에 부응하는 수중불분리성 콘크리트의 재료 및 시공성 개발과 수중불분리성 콘크리트의 품질관리의 기준을 마련하기 위해 2천 5년부터 2천 6년까지 2년동안 6억원을 들여 추진한다고 한다. 이 사업은 해양콘크리트 구조물의 안전성과 내구성 확보를 위한 고품질 콘크리트의 개발 필요성이 확대되고 있으며 특수콘크리트 개발로 해양공사의 환경오염이 억제돼 민원을 감소시키는 친환경구조물을 개발하며 신규 해안개발사업 창출을 도모할 수 있음에 따른 것이다. 또한 국내 콘크리트 재료분야로의 기술과급 및 응용기술의 방향을 제공하며 수입재료의 억제 및 국내혼화제 산업이 발전할 수 있는 계기를 마련할 수 있다. 수중불분리성 콘크리트의 품질관리 기준을 마련함으로써 기대되는 효과는 항만콘크리트 구조물의 신속 시공이 가능하며 콘크리트 구조물의 안정성 및 내구성을 확보할 수 있으며 환

경오염을 억제함으로써 공사에 대한 주변주민의 민원을 감소시키고 신규 해안 개발사업 창출 및 해양산업발전에 기여할 것으로 보인다. 또한 항만콘크리트 분야의 국제경쟁력을 확보해 국내 시공업체 및 혼화제 업체의 기술향상력과 사업활성화를 도모하기 위해 수중불분리성 콘크리트의 품질 기준을 마련한다고 한다.

우리나라는 경제발전과 더불어 건설분야의 급속한 성장으로 인하여 천연 골재자원의 부족량은 점차 고갈되고 있는 상태이며, 이에 따라 주요 골재의 공급원은 하천골재, 바다골재 및 석산골재로 급격히 다변화되어가고 있는 실정이다. 특히 석산골재는 국내에서는 가용량이 풍부한 편이어서 하천골재의 대체가 용이하므로 날로 급증하고 있는 골재 수요에 효과적으로 대처할 수 있다. 따라서 90년도 초에 이르러 부순모래를 콘크리트용 잔골재로 이용하려는 연구가 일부업체나 학계에서 이루어졌으며, 1995년 9월까지의 확인된 부순모래 생산업체 수는 전국적으로 50사 내외로 파악되었고, 부순모래 사용량도 93년 2%에서 98년 10%로 늘어났고, 앞으로도 수요가 증가할 것으로 예상된다.

따라서, 본 연구에서는 강모래, 바다모래와 부순모래의 혼입률 변화에 따른 수중불분리성 콘크리트의 품질변화를 측정하기 위해서 강모래에 바다모래를, 강모래와 바다모래에 각각 부순모래를 0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%로 혼입률을 변화시켜 적정 혼입률을 도출하고, 혼입률 변화에 따른 특성을 살펴보고자 한다.

1.2 연구범위 및 방법

본 연구에서는 국내 S사에서 생산되는 보통포틀랜드시멘트, 경남 용원 석산에서 생산되는 최대치수 25mm의 부순자갈, 경남 합천 황강에서 채취한 강모래, 전남 진도 앞바다에서 채취한 바다모래, 경남 용원 석산에서 생산된 부순모래, 국내 A사에서 생산되는 혼화제(수중불분리성 혼화제, 유동화제)를 사용한다.

설계기준강도 240kgf/cm², 물-시멘트비(W/C) 50%, 잔골재율 40%, 슬럼프

프플로우 50 ± 5 cm, 공기량 4%이하, 단위수량 $220\text{kg}/\text{m}^3$ 로 고정하고 잔골재의 종류를 강모래(R), 바다모래(S), 부순모래(C) 3종류로 하고, 강모래에 바다모래를, 강모래와 바다모래에 각각 부순모래를 0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%로 혼입률을 변화시켜 담수와 해수에서 각각 제작·양생한 수중불분리성 콘크리트의 각종 특성변화를 파악하기 위해 다음과 같은 순서 및 방법에 의하여 연구를 수행하고자 한다.

- ① 문헌고찰을 통하여 수중불분리성 콘크리트의 특성 살펴본다.
- ② 본 연구에 필요한 사용재료를 결정하고, 각 재료의 물성을 파악한다.
- ③ 본 연구의 설계조건을 기준으로 배합설계를 실시하여 기준시방배합표를 작성한다.
- ④ 잔골재의 종류를 강모래, 바다모래, 부순모래 3종류를 사용하고, 강모래에 바다모래를, 강모래와 바다모래에 각각 부순모래를 0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%로 혼입률을 변화시켜 시방배합표를 작성한다.
- ⑤ 굳지않은 수중불분리성 콘크리트의 특성을 파악하기 위해 작성된 시방배합표를 기준으로 재료분리저항성(pH 및 현탁물질량), 유동성(슬럼프플로우), 공기량을 측정하고 압축강도측정용 공시체를 각각 담수와 해수에서 제작·양생한다.
- ⑥ 경화된 수중불분리성 콘크리트의 특성을 파악하기 위해 담수와 해수에서 제작·양생된 수중불분리성 콘크리트의 단위중량과 압축강도를 재령 7일, 28일에 측정한다.

2. 문헌 고찰

2.1 수중불분리성 혼화제와 유동화제

수중불분리성 혼화제는 시멘트 수용액에 용해되어 콘크리트의 점성과 보수성을 증대시킴으로서 수중에 칠 때 물의 씻김작용에 의한 재료분리를 방지하는 특성을 가지고 있고, 수중불분리성 혼화제의 주성분은 수용성 고분자로 되어 있으며, 크게 구분하면 셀룰로오스계와 아크릴계 두 종류며, 요즘은 주로 셀룰로오스계가 주종을 이루는 추세이다.

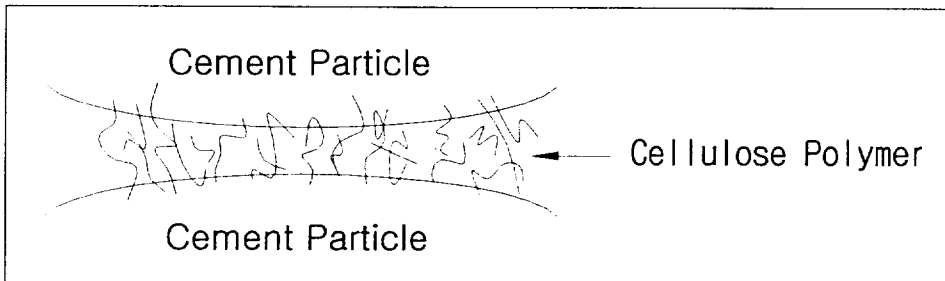


Fig. 2.1 Role of cellulose polymer

수중불분리성 혼화제 중 셀룰로오스계는 Fig. 2.1과 같이 시멘트 입자에 흡착되면서 시멘트 입자사이의 가교역할을 하게 되고, 혼합수의 점성을 증가시켜 물의 씻김작용에 대한 저항성을 증가시키게 되어 보통콘크리트와는 달리 시멘트 입자의 유실을 감소시키게 된다.

수중불분리성 혼화제의 주성분에 따른 분류는 Table 2.1과 같고, 품질에 대해서는 1999년 한국콘크리트학회에서 규정한 「콘크리트용 수중불분리성 혼화제 품질규준(KCI-AD-102)」이 있으며, 여기에 규정된 품질규준은 Table 2.2와 같다.

Table 2.1 Main ingredient of antiwashout underwater agent

Type	Chemical sign
Cellulose	Methyl Cellulose(MC)
	Hydroxy Ethyl Cellulose(HEC)
	Hydroxy Prophyl Cellulose(HPC)
	Hydroxy Ethyl Methyl Cellulose(HEMC)
	Hydroxy Prophyl Methyl Cellulose(HPMC)
	Hydro Ether Ethyl Cellulose(HEEC)
Acryl	Polyacrylamide
	Polyacrylamide and acrylicacidsoda of Copolymer
	Polyacrylamide part hydrolysis

Table 2.2 Quality standard of the antiwashout underwater agent

Item		Standard
Bleeding ratio (%)		Below 0.1
Setting time (hour)		Initial
		Final
Compressive strength	Compressive strength of molded underwater (kgf/cm ²)	7days
		28days
	Compressive strength ratio molded underwater/air (%)	7days
		28days
Flexural strength	Flexural strength ratio molded underwater/air (%)	7days
		28days
Underwater dropping test	Suspended solids (mg/ℓ)	Below 150
	pH	Below 12

수중불분리성 혼화제를 첨가하면 콘크리트의 점성이 증가하기 때문에 물의 씻김작용에 대한 분리저항성이 커지는 대신 시공성이 저하하므로, 소요의 시공성을 확보하기 위해서는 단위수량을 어느 한도 이하로 제한하고, AE감수제 또는 유동화제를 사용하는 것이 일반적이므로, 본 연구에서는 유동화제를 사용한다.

유동화제는 사용방법에 따라 고성능감수제와 유동화제로 구별되는데, 고성능감수제는 뛰어난 시멘트 분산효과를 이용하여 보통콘크리트와 동일한 작업 성능을 가지면서 W/C저감과 고강도화를 주목적으로 하는 경우에는 고성능감수제라 부르고, 동일한 W/C의 콘크리트에 첨가하여 콘크리트의 품질은 변동

없이 작업성만을 크게 향상시킨 콘크리트를 제조할 경우에 유동화제라 부른다.

유동화제의 기본적인 성능은 고성능감수제와 마찬가지로 시멘트 입자의 분산성능이 뛰어나 감수성능이 우수하며 아울러 응결지연 및 과도한 공기연행, 강도저하 등의 나쁜 영향 없이 단위수량을 대폭 감소시킬 수 있다. 이러한 유동화제에는 크게 주성분에 따라 폴리알킬아릴 설펜산염계, 멜라민포르말린수지 설펜산염계, 방향족다환축합물 설펜산염계 등으로 분류할 수 있고, 유동화제의 성능에 따라 표준형과 지연형으로 분류할 수 있는데 대한토목학회에서 제시한 유동화제의 품질규정은 Table 2.3과 같다.

Table 2.3 Quality standard of superplasticizer

Item		Type	Standard	Retard
Experiment item	Slump (cm)	Base concrete	8±1	
		Superplasticized concrete	18±1	
	Air value (%)	Base concrete	4.5±0.5	
		Superplasticized concrete	4.5±0.5	
Difference of bleeding (cm ³ /cm ³)			Below 0.1	Below 0.2
Difference setting time (min)	Initial		-30~+90	-60~+210
	Final		-30~+90	Below +210
Decrease in slump as to time (15min)			Below 4.0	Below 4.0
Decrease in air value as to time (15min)			Below 1.0	Below 1.0
Compressive strength ratio (%)	3 days		Over 90	Over 90
	7 days		Over 90	Over 90
	28 days		Over 90	Over 90
Length transformation ratio (%)			Below 120	Below 120
Relative dynamic modulus ratio of elasticity (%)			Over 90	Over 90

2.2 수중불분리성 콘크리트의 국내 연구 동향

수중에서 재료분리저항성이 우수하고 셀프레벨링성과 충전성이 뛰어난 수중 불분리성 콘크리트는 1974년 독일에서 개발되어 1977년 독일의 SIBO사에 의해 사용되기 시작하였다. 최근에는 이러한 장점들을 고려하여 간극충전시공, 고품질의 수중콘크리트, 수중에서의 철근콘크리트 구조물, 강관 및 강판의 방식라이닝, 그리고 보수, 보강공법에 적용되는 등 그 사용이 일반화되고 있다.

이와 같이 수중불분리성 콘크리트는 종래의 수중콘크리트에서는 생각할 수 없었던 다양한 용도와 규모로 사용되고 있기 때문에 그 사용이 더욱 더 일반화 될 것으로 생각된다.

우리 나라에서도 1980년대 중반에 수중불분리성 콘크리트 기술이 도입되어 1995년 대한토목학회에서 「콘크리트용 수중불분리성 혼화제 품질규준(안)」을 작성하였고, 1996년 개정된 「콘크리트표준시방서」 시공편에 수중불분리성 콘크리트에 관한 규정을 처음으로 추가하였으며, 1999년 개정된 「콘크리트표준시방서」에는 적용범위와 재료편 등의 규정을 더 추가하는 등 그 관심이 날로 증가하고 있다.

그러나 국내에서 생산되는 수중불분리성 혼화제는 제조회사와 특성에 따라 표준사용량, 사용방법, 그리고 배합설계방법 등이 상이함으로 인하여 사용상에 많은 어려움이 발생하고 있기 때문에 수중불분리성 혼화제와 수중불분리성 콘크리트의 특성에 따른 올바른 사용방법에 대한 연구가 지속적으로 수행되고 있는 추세이고, 현재까지의 각 대학교 학위논문들을 중심으로 소개하면 다음과 같다.

(1) 국민대학교

- 강수용, '셀룰로오스계 혼화제 사용 수중불분리성 콘크리트 특성 연구', 1993

(2) 금오공과대학교

- 장일영, '수중불분리 콘크리트의 부착특성에 관한 실험적 연구', 1996
- 송재호, '수중불분리 콘크리트의 제강도 특성에 관한 실험적 연구', 1996

(3) 부산대학교

- 한태영, '수중비분리 콘크리트의 최적 배합비에 관한 연구', 1995
- (4) 서울산업대학교
 - 박상욱, '수중불분리성 콘크리트에서 혼화제의 최적 배합비에 관한 연구', 1998
- (5) 연세대학교
 - 백병훈, '혼화제 종류에 따른 수중불분리 콘크리트의 특성에 관한 연구', 1999
- (6) 한양대학교
 - 채소연, '수중불분리성 혼화제 사용 콘크리트의 제성질에 대한 실험적 연구', 1993
 - 이재준, '수중불분리성 콘크리트의 제물성을 향상시키기 위한 실험적 연구', 1999
- (7) 경상대학교
 - 권중현, '플라이애쉬를 혼입한 해수중불분리성 콘크리트의 특성', 1999
- (8) 부경대학교
 - 백동일, '해사를 사용한 수중불분리콘크리트의 특성에 관한 기초적 연구', 1997
 - 어영선, '수중불분리콘크리트의 최적 물-시멘트비에 관한 실험적 연구', 1997
 - 최의식, '해사를 사용한 수중불분리콘크리트의 강도발현에 관한 연구', 1997
 - 김광민, '해사 혼합을 변화에 따른 수중불분리콘크리트의 특성에 관한 실험적 연구', 1998
 - 김기동, '수중불분리콘크리트의 부착강도특성에 관한 기초적 연구', 1998
 - 이상명, '제작환경에 따른 수중불분리성 콘크리트의 특성에 관한 실험적 연구', 1999
 - 윤재범, '배합조건과 양생수에 따른 수중불분리성 콘크리트의 특성에 관한 연구', 1999
 - 이동화, '수중불분리성 콘크리트의 장기강도 특성에 관한 실험적 연구', 2000

- 김동명, '배합시간 및 배합량이 수중불분리성 콘크리트의 특성에 미치는 영향, 2000
- 고창섭, '수중불분리성 콘크리트의 재료역학적 특성에 관한 연구, 2000
- 양영인, '고로슬래그미분말을 혼입한 수중불분리성 콘크리트의 특성에 관한 연구, 2000
- 신현필, '잔골재의 종류에 따른 수중불분리성 콘크리트의 특성에 관한 연구, 2001

이상과 같이 소개된 수중불분리성 콘크리트에 관한 여러 연구들은 주로 수중불분리성 혼화제의 사용량과 종류에 따른 수중불분리성 콘크리트의 기초적 특성을 파악한 연구들이 대부분이고, 현재에는 고강도 수중불분리성 콘크리트에 관한 연구나 시멘트를 고로슬래그나 플라이애쉬로 치환한 수중불분리성 콘크리트에 관한 연구들이 진행중이며, 특히 부경대학교 건설재료실험실에서는 수중불분리성 콘크리트를 해양에 적용하기 위한 연구들을 진행하고 있다.

2.3 해수

해수는 채취장소에 따라 다소 차이가 있으나 일반적인 물리·화학적 성질을 정리하면 Table 2.4와 같다.

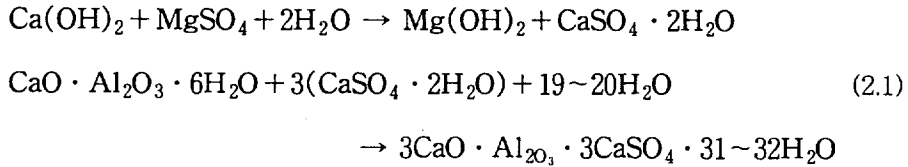
Table 2.4 Physical & chemical properties

Density (t/m ³)	pH	Salt content (%)			
1.024 ~ 1.030	7.5 ~ 8.4	2.8 ~ 4.2	NaCl	75~80	
			MgCl ₂	10~11	
	Chemical compound of Br & I	Little			
	Sulfate	10~11	MgSO ₄	50	
			CaSO ₄ , K ₂ SO ₄	50	

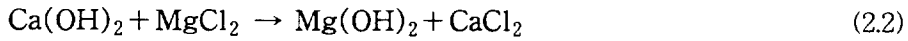
콘크리트는 해수의 물리·화학적 작용을 받아 시간과 함께 열화를 일으키게 되는데, 해수의 물리적인 작용으로서는 파랑, 공동, 온도, 습도변화, 표사, 그리고 표류고형물의 충돌 등이 있다. 파랑이나 고형물의 충돌은 콘크리트 표

층부의 파손을 촉진하고, 건전한 콘크리트에서도 표사 등에 의한 지속적인 마모작용을 받아서 현저하게 손실되는 일이 있다.

화학적인 작용으로서는 시멘트 속의 유리석회나 수화생성물인 수산화칼슘은 해수에 대해 가용성이기 때문에 해수중에 용출되는 것에 의해 서서히 콘크리트 경화체 조직의 틈이 만들어지고 다공질화 되지만, 수산화칼슘의 용출즉시 강도저하나 질량감소가 일어나는 것이 아니라, 오랜 세월동안에 서서히 철근에 대한 방청기능을 저하시키는 등의 영향을 미친다. 그러나 해수의 염류중에 5%정도 포함되어 있는 황산마그네슘은 식 (2.1)과 같이 시멘트 속의 C_2S 및 C_3S 의 수화생성물인 수산화칼슘과 반응하고, 나아가 시멘트성분의 C_3A 의 수화생성물과 반응하여 에트링자이트(ettringite)가 생성된다. 이렇게 생성된 에트링자이트 결정은 용적이 증가하게 되고, 결국 콘크리트는 표층에서부터 팽창압에 의해 서서히 파괴된다.



해수중 염분의 약 90%를 차지하고 있는 염화물은 식 (2.2)와 같이 수산화 칼슘과 반응하여 해수에 대해 가용성인 염화칼슘을 생성하고 콘크리트를 다공 질화하지만, 일반적으로 그 반응은 완만하다.



2.4 부순모래

2.4.1 부순모래에 사용되는 암석

부순모래에 사용되는 암석은 크게 나누어 화강암, 대리석, 점판암, 사암, 편암 및 편마암, 응회암, 현무암, 섬록암 등을 들 수 있으며, 이 중 전 국토의 2/3을 차지하고 있는 암석은 주로 화강암, 사암 및 점판암, 편암 및 편마암 등 자원이 풍부한 편이다. 그러나 연질의 사암, 연질의 응회암, 풍화된 암석 등의 연약한 것, 또한 부술 때 결정 사이에 균열이 남아 있을 염려가 있는 것, 콘크리트 품질에 악영향을 미치는 것은 사용하면 안된다. 그리고 부순모래의 원석에는 표토 및 기타 불순물을 제거한 것을 사용하여야 한다.

레미콘 골재로 이용되는 암석별 사용 실태에 관한 정확한 자료는 없으나 수도권 지역의 경우 화강암류의 암석이 대부분 사용되고 있으며 경상도 지역의 경우는 퇴적암류인 점판암 및 사암 등이 넓게 분포되어 이들 암석을 콘크리트 용 주요 골재로 이용하고 있다.

2.4.2 부순모래에 사용되는 원석의 성질

① 개요

암석의 주된 조암광물은 석영과 장석으로 구성되어 있으며, 석영은 화학적 풍화작용에 대한 저항성이 강하여 잔적토층에서 모래입자로 남아 있으나 장석은 물리적, 화학적 풍화작용을 받는 동안 점토로 변화됨으로써 자체 저항력과 결집력이 상실되어 콘크리트용 골재로 이용할 경우 내마모성 및 흡수율 등에 적지 않은 영향을 미치게 된다. 따라서 부순돌 및 부순모래에 이용되는 원석의 성질 중 다음과 같은 사항들이 사전에 검토되어야 한다.

② 비중

암석의 비중은 조암광물의 종류와 비율, 공극의 정도 등에 따라 달라진다. 일반적으로 이들의 비중이라면 겉보기 비중을 말하며 2.65 정도이지만 암석의 종류에 따라 다르기 때문에 사용 암석에 대한 비중을 사전에 반드시 검토하여야 한다.

③ 흡수율

암석의 흡수율은 풍화, 파괴, 내구성 등에 크게 영향을 받는다. 흡수된 물의 양은 암석 분자 간의 공극에 침투하기 때문에 공극률을 알 수 있다. 흡수율이 크다는 것은 다공성이라는 것을 나타내며 대체로 동해를 받기 쉽다는 것을 의미한다. 따라서 암석별 흡수율에 대한 시험 및 자료에 대해서 조사를 해둘 필요가 있다.

④ 압축강도

일반적으로 역학적 성질을 비교함에 있어서 압축강도를 기준으로 하는 경우가 대부분이다. 암석의 압축강도는 공극률이 적을수록, 구성 입자가 작을수록 결정도와 그 결합상태가 좋을수록 크다. 또한 흡수율에 대하여 많은 영향을 받으며, 흡수율이 높을수록 강도가 저하됨을 알 수 있다. 또한 석영의 함량이 증가하거나 입자의 크기가 작아질 경우 압축강도는 증가하는 경

향이 있다.

⑤ 선팽창계수

조암광물의 선팽창계수는 Table 2.5에서와 같이 광물 성분에 따라 다르며, 그 결정도 다르므로 암석이 온도 변화에 의해 신축될 때는 암석 내부에 매우 복잡한 응력이 발생하여 암석 붕괴의 큰 원인이 된다. 이 계수는 온도의 고저에 따라 상당한 차이가 있다. 암석은 열에 의한 불량 도체이므로 열의 불균질 분포가 생기기 쉬우며, 이로 인하여 열응력과 조암광물의 팽창계수가 상이한 원인 등으로 인해 1000℃ 이상의 고온을 가열하면 암석은 파괴된다.

Table 2.5 Coefficient of linear expansion as to kinds of rock ($\times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$)

Kinds	Temperature (°C)					
	300	500	600	750	900	1060
Granite	0.101	0.063	0.137	0.339	0.337	0.264
Andesite	0.023	0.051	0.124	0.105	0.086	0.093
Tuff	0.027	-	0.035	0.070	0.094	0.021
Lime ston	0.090	0.170	0.220	-	-	-

⑥ 물리적 특성

일반적으로 물리적 성질로는 비중(Specific gravity), 공극률(Porosity), 함유율(Water content), 경도(Hardness), 강도(Strength) 등을 들 수 있다. 부순들의 물리적 성질을 측정 및 표시하기 위하여 비중, 흡수율, 마모 감량, 안정성 시험을 행하며, 때에 따라서는 강도, 경도도 측정하는 경우가 있다.

암석의 골재로서의 성질을 비교하며 Table 2.6과 같다.

Table 2.6 Physical of properties

Division	Classification	Specific gravity	Abs. (%)	Abrasion loss (%)	Core hardness	Compressive strength (kgf/cm ²)
Igneous rock	Granite	2.5~2.8	0.2~2.8	5~70	38~95	800~3,050
	Diorite	2.7~3.0	0.3~0.9	5~30	80	800~3,100
	Liparite	2.5~2.8	0.3~0.9	6~19	42~108	700~3,000
	Propylite	2.6~3.0	0.3~1.5	8~21	52~92	800~2,800
	Basalt	2.7~3.2	0.5~1.3	8~27	72~89	1,400~3,600
Sedimentary rock	Conglomerate	2.6~2.7	0.2~1.2	6~14	40~108	1,100~3,800
	Sandstone	2.2~2.7	0.2~2.5	10~41	-	900~2,200
	Tuff	1.8~2.6	0.7~5.5	9~45	65~102	1,100~4,300
	Lime stone	2.5~2.7	0.3~1.1	15~32	40~58	500~1,200
Metamorphic rock	Vasion	2.5~2.9	0.3~2.6	7~14	-	800~3,000
	Schist	2.6~3.0	0.2~1.8	7~15	23	800~3,500

암석은 일정 온도까지는 내화적이지만 일정 범위를 초과하게 되면 급격히 파괴되는 성질을 가지고 있다. 이들 암석 중 우리 나라 국토의 대부분을 차지하고 있는 화강암은 400℃까지는 압축강도가 단조로운 감소현상을 나타냈으나, 500~600℃ 사이에서는 강도의 급격한 감소현상을 나타내고, 800℃ 이상에서는 압축강도가 거의 발현되지 않는 것을 알 수 있다. 이는 일정 온도이상이면 암석 내의 체적 팽창이 일어나 그 체적 변화가 화강암의 파쇄에 영향을 주게 된다. 그러나 현재 국내에서 생산되는 골재의 원석이 대부분 화강암이므로 사용이 불가피한 실정이다.

⑦ 화학적 특성

대표적인 화학적 특성으로 탄산화 작용이 있는데, 건축물에 사용되는 암석의 대부분이 공기중에 탄산, 약염산 또는 황산류에 의해 생긴 침식과 이들 산류를 포함한 물의 흡수에 의해 팽창, 수축이 반복되면 장기간에 걸쳐서 탄산화에 의한 침해를 받아 콘크리트의 내부 균열 및 철근의 부식을 촉진시키므로 이에 대한 사전 검토가 요구된다.

골재의 알칼리 반응은 시멘트 중의 알칼리량($\text{Na}_2\text{O} + 0.685\text{K}_2\text{O}$)과 반응성 실리카의 반응에 의해 규산소다가 되는 것으로 $\text{SiO}_2 + 2\text{NaOH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2\text{H}_2\text{SiO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 로 표시된다. 시멘트 중의 알칼리량은 최소 0.6%, 최대 1.05% 그리고 평균 0.73% 정도로, 골재 중에 반응성 실리카질이 함유되어 있는 경우에는 저알칼리 시멘트나 포졸란 물질 등을 첨가하여 사

용해야 한다. 국내에서는 알칼리골재반응에 대한 피해 사례가 거의 없지만 부순돌 및 부순모래의 사용이 활성화됨에 따라 알칼리골재반응에 대한 검사가 요망되며 이를 선별적으로 활용하는 것이 바람직하다고 사료된다.

⑦ 부순모래와 콘크리트 특성에 관한 고찰

이미 보편화된 부순자갈은 그 사용에 있어 아무런 의미를 제기하지 않으나, 부순자갈 생산시 발생한 석분을 제거공한 부순모래는 대다수 현장에서 모래로서 인정하지 않고 전혀 별개의 재료로 치부하고 있는 실정이다. 그러나, 수만년에 걸친 풍화작용과 마로작용으로 그 형상이 둥글고 표면이 매끄러운 천연사와 달리, 부순모래는 부순자갈과 동일하게 인위적으로 단시간에 제조하기 때문에 입형이 천연사에 비하여 다소 떨어지며, 표면이 거칠다는 것과 미분 특성이 천연사의 토분 특성과는 다르며, 입형은 설비개선과 생산 기술 개발로 천연사에 근저한 품질의 부순모래를 생산할 수 있다.

입형은 거의 천연사 수준으로 크게 개선되었고 표면 거칠기도 입형과 함께 많이 향상되었으나, 천연사 수준으로 발전시키기 위해서는 최적 설비선정과 생산기술의 개선이 요구된다. 부순자갈과 마찬가지로 부순모래의 거친 표면은 시멘트와의 부착강도를 증가시켜 콘크리트 강도를 증가시키는 역할을 하지만, 표면적 증가로 인한 단위수량이 증가하는 단점이 있다. 삼표산업과 주택연구소가 공동으로 실시한 부순모래에 대한 연구와 자체 실험 및 다년간의 현장 경험을 종합하면, 입형판정실적율이 55%이상일 경우 천연사를 사용한 콘크리트의 품질과 거의 동등한 수준으로 사용에 문제가 없는 것으로 판명되었다. 그리고 입형판정실적율이 2% 증가하면, 슬럼프는 9.7~33.6% 증가하고, 입형에 관계없이 경화 콘크리트의 강도는 천연사보다 뛰어난 것으로 나타났다. 콘크리트에 미치는 영향은 미분율이 3.5% 증가하면, 슬럼프는 2.1cm 감소하고 공기량은 1%정도, 블리딩은 31%정도 감소하였으며, 미분율이 7%일 경우 미분이 없을 경우에 비하여 초결이 60분, 종결이 80분 단축되는 것으로 나타났다.

미분량이 압축강도에 미치는 영향은 미분율이 7%일 때 강도 증진 현상이 뚜렷하였으며, 탄성계수는 미분율이 3.5~7.%에서 가장 높았다. 건조수

축은 자연사에 비해 전반적으로 높았으나, 입형이 55%이상으로 개선되고 미분율은 4%이하로 관리할 경우 건조수축을 낮출 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 실험실 적용결과를 토대로 현장에서 실시한 부순모래 100%와 혼합사 50:50, 인천해사 100%에 대한 현장적용 시험 결과, 해사에 비해 부순모래의 단위수량이 8% 증가되는 것으로 나타났으나, 혼합사는 해사 수준의 단위수량으로 해사와 같은 품질의 콘크리트를 만들 수 있다고 한다.

현장코어 및 공시체를 통한 압축강도 시험결과에 의하면 해사에 비해 3~6%정도 향상되고, 코어 채취 위치에 따른 압축강도도 차이가 없는 것으로 밝혀져, 재료분리가 없고 품질 균질성이 우수한 것으로 나타났다.

콘크리트 펌핑성, 충전성 및 마감성은 부순모래, 혼합사, 해사 모두 우수하였다. 이는 시공이 정상적으로 이루어진다면 콘크리트의 품질에는 이상이 없다는 것을 의미한다. 그러나 부순모래 콘크리트의 건조수축율이 해사에 비해 다소 높게 나왔으나, 혼합모래는 해사를 사용하였을 때와 동일하게 나타난 것으로 보아, 입형이 낮을 경우 부순모래 단독 사용에 시공상 좀더 세심한 관리가 필요하나, 입형이 55% 이상이고, 미분량을 4% 미만으로 조정하면 단위수량 증가를 최소화할 수 있어 부순모래 단독으로도 사용이 가능할 한다고 한다.

따라서 부순모래의 품질을 입형판정실적율을 55%이상, 미분량을 4%이하로 관리하고, 품질 균일성을 잃지 않도록 생산관리를 철저히 하여 소비자들이 안심하고 부순모래를 사용할 수 있도록 하여야 한다. 이와 함께 생산기술 향상에 힘써 입형이 천연모래와 같은 수준으로 향상시키고, 콘크리트 품질특성에 가장 적합한 입도분포를 찾아, 그 입도에 맞는 제품을 생산함으로써 천연모래로서는 이를 수 없는 독자적인 영역을 구축할 수 있다고 한다.

3. 실험계획 및 방법

3.1 실험파라미터

본 연구에서는 설계기준강도를 240kgf/cm^2 , W/C를 50%, 잔골재율을 40%, 슬럼프플로우 $50 \pm 5\text{cm}$, 공기량 4%이하, 단위수량을 220kg/m^3 로 고정시키고, 잔골재의 종류를 강모래(R), 바다모래(S), 부순모래(C) 3종류를 사용하고, 강모래에 바다모래를, 강모래와 바다모래에 각각 부순모래를 0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%로 혼입률을 변화시킨 수중불분리성 콘크리트의 실험파라미터를 Table 3.1에 나타냈다.

Table 3.1 Experimental parameter

Kinds of fine aggregate	Variation of Blend Ratio of Sea Sand (%)	Variation of Blend Ratio of Crushed Sand (%)
River sand (R)	0%	0%
	20%	20%
	40%	40%
	60%	60%
	80%	80%
	100%	100%
Sea sand (S)	-	0%
	-	20%
	-	40%
	-	60%
	-	80%
	-	100%

3.2 실험방법

3.2.1 수중불분리성 콘크리트의 제작

Fig. 3.1과 같이 콘크리트의 제작은 혼합용적(Mixing capacity) 60 ℓ인 강제식 믹서를 사용한다. 잔골재, 굵은골재, 시멘트, 수중불분리성 혼화제 순으로 믹서에 투입하여 건비빔을 실시한 후 배합수와 유동화제를 투입하여 수중불분리성 콘크리트를 제작한다.

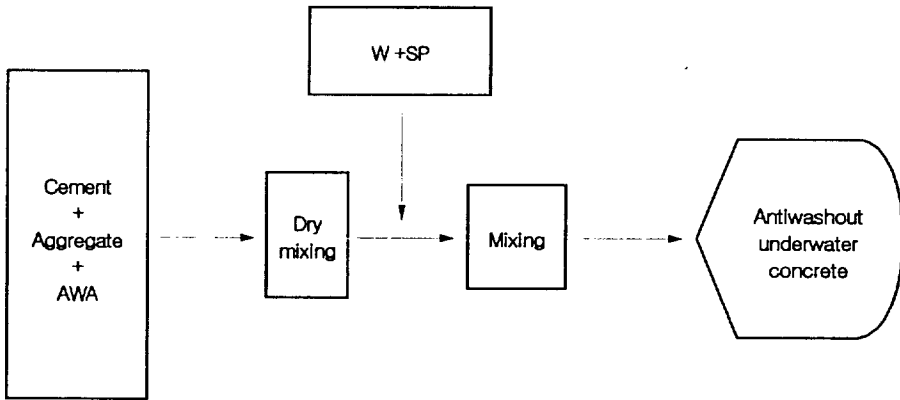


Fig. 3.1 Production flow of antiwashout underwater concrete

3.2.2 압축강도측정용 공시체제작 및 양생

압축강도측정용 공시체의 제작에는 표준몰드($\phi 10 \times 20$)를 사용하고, 한국콘크리트학회규준에 따라 Fig. 3.2와 같이 수조속에 몰드를 거치하여 몰드의 상단에서 10cm위까지 물을 채우고, 비벼진 콘크리트를 핸드스쿠프(Hand scoup)를 이용하여 10등분 이상 분할한 양만큼, 수면에서 조용히 수중낙하시켜 봉우리 모양이 되도록 한 다음 몰드를 수조에서 꺼내어 5~10분 정도 정치시킨다. 몰드상면은 흙손으로 캠핑할 양만큼 남겨두고 마감한 다음, 캠핑후 탈형강도에 이르렀을 때 탈형하여 $20 \pm 3^\circ\text{C}$ 의 담수와 해수에서 양생한다.

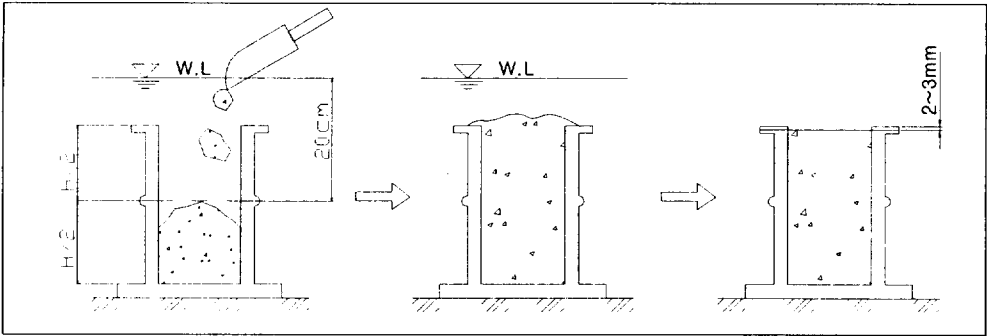


Fig. 3.2 Schematic of cast in underwater specimen for test of compressive strength

3.2.3 굳지않은 콘크리트시험

(1) 재료분리저항성시험

재료분리저항성시험은 한국콘크리트학회에서 규정한 「콘크리트용 수중불분리성 혼화제 품질규준」의 「수중낙하시험 방법」에 준하여 실시하고, 시험방법은 1000cc비이커(외경 110mm, 높이 150mm)에 800cc의 증류수를 채우고 500g의 콘크리트를 10등분 이상 되게 수면에서 수중으로 조용히 분할 투입한 다음, 비이커에 600cc의 현탁용액을 채취하여 각 혼화재료의 첨가량에 따른 수중불분리성 콘크리트의 현탁액의 pH와 현탁물질량을 측정한다.

(2) 유동성시험

유동성을 파악하기 위해서 한국콘크리트학회에서 제시한 「콘크리트용 수중 불분리성 혼화제 품질규준」의 「수중불분리성 콘크리트의 슬럼프플로우 시험 방법」에 준하여 실시하고, 「KS F 2402 콘크리트 슬럼프시험」에 준하는 슬럼프콘과 다짐봉을 사용하여 슬럼프플로우를 측정한다. 슬럼프플로우 측정은 슬럼프콘을 제거하고 정치표준시간 5분 경과 후 콘크리트가 퍼진 직경이 최대인 방향과 그것의 직각방향에서 0.5cm까지 측정하여 그 평균값을 슬럼프 플로우로 한다.

(3) 공기량시험

콘크리트에 과다한 공기량은 강도저하에 지대한 영향을 미치므로, 굳지않은

콘크리트의 공기함유량은 「KS F 2421 굳지않은 콘크리트의 압력법에 의한 공기함유량 시험(공기실압력방법)」에 준하여 워싱턴 에어미터를 사용하여 측정한다.

3.2.4 경화된 콘크리트시험

(1) 단위중량시험

단위중량시험은 바다모래와 부순모래 혼입률 변화 따라 담수와 해수에서 각각 제작·양생된 수중불분리성 콘크리트의 압축강도측정용 공시체의 중량을 재령 7일, 28일에 측정하여 단위중량으로 환산하였다.

(2) 압축강도시험

압축강도시험방법은 「KS F 2405 콘크리트의 압축강도 시험방법」에 준하여 실시하며, 압축강도시험은 담수와 해수에서 각각 제작·양생된 공시체를 재령 7일, 28일에 측정하였다.

3.3 사용재료

3.3.1 시멘트

본 연구에서는 국내 S사의 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며 물리·화학적특성은 Table 3.2와 같다.

Table 3.2 Physical & Chemical properties of ordinary portland cement

Physical property			Chemical composition (%)					
Specific gravity	Ignition loss (%)	Insoluble residue (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
3.14	0.5~1.3	0.2~0.9	21.0~22.5	4.5~6.0	2.5~3.5	63.0~66.0	0.9~3.3	1.0~2.0

3.3.2 골재

본 연구에서 사용한 굵은골재는 경남 용원 석산에서 생산한 굵은골재 최대 치수가 25mm인 부순자갈을 사용하였고, 잔골재는 경남 합천 황강에서 채취한 강모래와 전남 진도 앞바다에서 채취한 바다모래를 상용수로 제염하여 사용하였고, 경남 용원 석산에서 채취한 부순모래를 사용하였으며, 사용골재의 물리적특성은 Table 3.3과 같다.

Table 3.3 Physical properties of aggregates

Kind \ Item	G _{max} (mm)	Specific gravity	Water abs. (%)	FM	Unit weight (kg/m ³)	Shell content (%)	Chloride cont. (×10 ⁻³ %)	
							NaCl	Cl ⁻
Coarse aggregate.	25	2.62	1.0	6.97	1520	-	-	-
Fine aggregate. (River sand)	-	2.58	1.80	2.66	1540	-	-	-
Fine aggregate. (Sea sand)	-	2.58	1.80	2.75	1537	7.0	2.6	2.0
Fine aggregate. (Crushed sand)	-	2.66	3.00 below	3.00	-	-	-	-

3.3.3 혼화재료

본 연구에서는 국내 A사에서 생산되는 셀룰로오즈 에테르계의 수중불분리성 혼화제와, 멜라민계의 유동화제를 사용하였으며, 각각의 물리·화학적특성은 Table 3.4와 같다.

Table 3.4 Physical & Chemical properties of admixtures

Kinds \ Item	Specific gravity	Phase	pH	Main ingredient
Antiwashout underwater agent	1.06±0.02	White powder	7±0.1	Hydroxy Ethyl Cellulose
Superplasticizer	1.22±0.02	Light-brown liquid	11.5±1.5	Melamine

3.3.4 실험수

본 연구에서는 제작환경에 따른 수중불분리성 콘크리트의 특성을 파악하기 위해서 담수, 해수를 사용하였는데, 담수는 상용수로 사용되는 수도수를 사용하며, 해수는 부산광안대교 건설현장부근의 천연해수를 채취하여 사용한다. 실험수들의 pH와 염화물을 측정된 결과는 Table 3.5와 같다.

	Fresh water	Sea water
pH	8.426	8.097
Chloride content (%)	-	3.21 ~ 3.40

3.4 배합설계

본 연구에서는 배합설계를 수행하기 위해 부경대학교 건설재료실험실서 「배합조건과 양생수에 따른 수중불분리성 콘크리트의 특성에 관한 연구」에서 도출된 배합강도와 시멘트-물비와의 관계식을 이용하여 다음과 같은 순서와 방법으로 배합설계를 실시하였다.

① 배합강도(f_{cr})가 240kgf/cm²일 때 배합계산을 수행하면 다음과 같다.

② W/C 계산

$$f_{cr} = -353 + 295 C/W \text{에서}$$

$$W/C = \frac{295}{353 + f_{cr}} = \frac{295}{353 + 240} = 0.5$$

$$\approx 50\% < 65\% \text{ ----- O.K}$$

③ 단위수량(W) 결정

슬럼프플로우는 50cm, G_{max} 25mm일 때, 단위수량은 220 kg/m³이다.

④ 단위시멘트량(C) 결정

$$C = 220 \div 0.50 = 440 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

⑤ 골재량 결정

굵은골재가 부순자갈이고, 최대치수(G_{max})가 25mm일 때 굵은골재 절대용적(V_G)은 364 l/m^3 이다.

본 연구에서는 잔골재로 강모래를 사용하고 잔골재율(s/a) 40%로 하여, 골재의 전용적 및 각 골재의 단위량은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V_{(G+S)} &= 1000 - (220 + \frac{440}{3.14} + 40) \\ &= 599.9 \text{ (l/m}^3\text{)} \end{aligned}$$

$$V_S = V_{(G+S)} \times s/a = 599.9 \times 0.40 = 240 \text{ (l/m}^3\text{)}$$

$$S = 240 \times 2.58 = 619 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

$$V_G = V_{(G+S)} - V_S = 599.9 - 240 = 359.9 \text{ (l/m}^3\text{)}$$

$$G = 359.9 \times 2.62 = 943 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

설계기준강도를 240 kgf/cm^2 , W/C를 50%, 잔골재율 40%, 슬럼프플로우 $50 \pm 5 \text{ cm}$, 공기량 4%이하, 단위수량을 220 kg/m^3 로 고정시키고, 잔골재로 강모래를 사용한 경우를 기준으로 하여 배합설계를 수행한 결과 Table 3.6과 같은 기준시방배합표를 얻을 수 있었다.

Table 3.6 Standard mix proportion

f_{ck} (kgf/cm^2)	W/C (%)	Slump flow (cm)	Air content (%)	G_{max} (mm)	s/a (%)	Unit weight (kg/m^3)					
						W	C	S	G	AWA	SP
240	50	50 ± 5	below 4.0	25	40	220	440	619	943	2.64	8.80

⑥ 기준시방배합표의 배합사항을 기준으로 실험조건인 바다모래와 부순모래

혼입률 변화에 따른 배합설계를 실시한 결과는 Table 3.7과 같다.

Table 3.7 Mix proportion of antiwashout underwater concrete

Symbol	f _{cu} (kgf/cm ²)	G _{max} (mm)	Slump flow (cm)	Air Value (%)	s/a (%)	W/C (%)	Unit weight (kg/m ³)						Admixture	
							W	C	R.S	S.S	C.S	G	AWA	SP
RS- 0	240	25	50±5	4이하	40	50	220	440	619	0	-	943	2.64	8.8
RS- 20	240	25	50±5	4이하	40	50	220	440	495	124	-	943	2.64	8.8
RS- 40	240	25	50±5	4이하	40	50	220	440	371	248	-	943	2.64	8.8
RS- 60	240	25	50±5	4이하	40	50	220	440	248	371	-	943	2.64	8.8
RS- 80	240	25	50±5	4이하	40	50	220	440	124	495	-	943	2.64	8.8
RS-100	240	25	50±5	4이하	40	50	220	440	0	619	-	943	2.64	8.8
RC- 0	240	25	50±5	4이하	40	50	220	440	619	-	0	943	2.64	8.8
RC- 20	240	25	50±5	4이하	40	50	220	440	495	-	128	943	2.64	8.8
RC- 40	240	25	50±5	4이하	40	50	220	440	372	-	255	943	2.64	8.8
RC- 60	240	25	50±5	4이하	40	50	220	440	248	-	383	943	2.64	8.8
RC- 80	240	25	50±5	4이하	40	50	220	440	124	-	511	943	2.64	8.8
RC-100	240	25	50±5	4이하	40	50	220	440	0	-	638	943	2.64	8.8
SC- 0	240	25	50±5	4이하	40	50	220	440	-	619	0	943	2.64	8.8
SC- 20	240	25	50±5	4이하	40	50	220	440	-	495	128	943	2.64	8.8
SC- 40	240	25	50±5	4이하	40	50	220	440	-	372	255	943	2.64	8.8
SC- 60	240	25	50±5	4이하	40	50	220	440	-	248	383	943	2.64	8.8
SC- 80	240	25	50±5	4이하	40	50	220	440	-	124	511	943	2.64	8.8
SC-100	240	25	50±5	4이하	40	50	220	440	-	0	638	943	2.64	8.8

4. 실험결과 및 고찰

4.1 굳지않은 수중불분리성 콘크리트의 특성

Table 4.1은 잔골재로 강모래, 바다모래, 부순모래를 사용하고, 강모래에 바다모래를, 강모래와 바다모래에 각각 부순모래를 0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%로 혼입률을 변화시킨 굳지않은 수중불분리성 콘크리트의 재료분리저항성을 파악하기 위해 현탁액의 pH와 현탁물질량을, 유동성을 파악하기

위해 슬럼프플로우시험을, 공기량 특성을 파악하기 위해 워싱턴에어미터로 공기량을 측정한 결과이다.

Table 4.1 Results of fresh concrete

Symbol	pH	Suspension (mg/ ℓ)	Slump flow (cm)	Air content (%)
RS- 0	11.131	75.3	52.0	1.8
RS- 20	11.131	74.3	52.0	1.7
RS- 40	11.057	62.5	51.0	1.6
RS- 60	11.161	78.6	51.0	1.9
RS- 80	11.181	80.2	51.0	2.3
RS-100	11.067	80.3	49.3	2.5
RC- 0	11.131	75.3	52.0	1.8
RC- 20	11.086	73.0	51.0	1.3
RC- 40	11.042	68.5	51.3	2.8
RC- 60	10.995	57.2	49.8	2.8
RC- 80	10.981	47.2	50.0	2.6
RC-100	10.939	42.7	48.0	2.5
SC- 0	11.067	80.3	49.3	2.5
SC- 20	11.032	75.9	49.0	2.5
SC- 40	10.994	69.8	51.8	3.0
SC- 60	10.963	59.8	50.8	2.8
SC- 80	10.992	49.6	50.5	2.5
SC-100	10.939	42.7	48.0	2.5

4.1.1 재료분리저항성

Fig. 4.1과 Fig. 4.2는 강모래에 바다모래를, 강모래와 바다모래에 각각 부순모래 혼입률을 변화시킨 굳지않은 수중불분리성 콘크리트의 재료분리저항성을 파악하기 위해 현탁액의 pH와 현탁물질량을 측정한 결과이다.

Fig. 4.1과 Fig. 4.2에서 실험조건에 관계없이 현탁액의 pH와 현탁물질량은 모두 한국콘크리트학회에서 규정한 「콘크리트용 수중불분리성 혼화제 품질기준」의 기준치인 12이하, 150mg/l 이하를 만족하는 것으로 나타났다.

Fig. 4.1과 Fig. 4.2에서 강모래에 바다모래를 혼합할 경우 혼합율 40%를 전후하여 pH와 현탁물질량이 증가하는 경향을 보이고 있다.

부순모래 혼입률이 증가할수록 pH와 현탁물질량은 감소하는 경향이 나타났는데, 이것은 부순모래의 흡수율이 높기 때문에 상대적으로 단위수량이 감소하여 물의 씻김 작용에 대한 저항성이 커지기 때문이라고 사료된다.

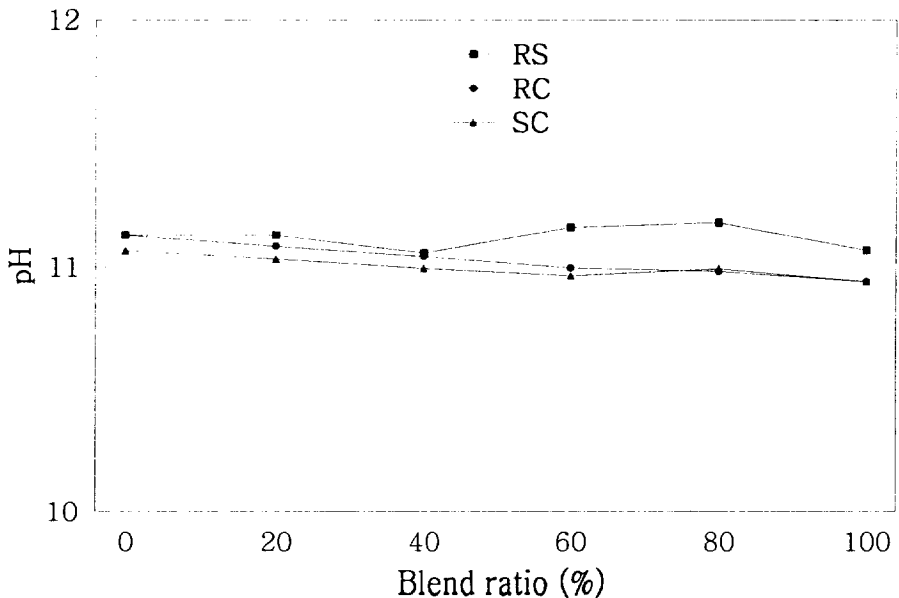


Fig. 4.1 pH as to variation of blend ratio

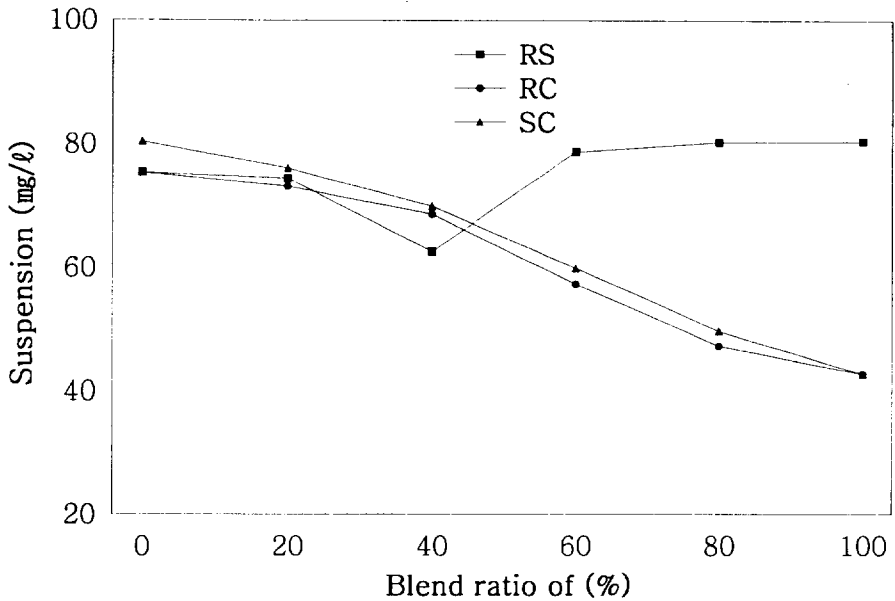


Fig. 4.2 Suspension as to variation of blend ratio

4.1.2 유동성

Fig. 4.3은 강모래에 바다모래를, 강모래와 바다모래에 각각 부순모래 혼입률을 변화시킨 굳지않은 수중불분리성 콘크리트의 유동성을 파악하기 위해 슬럼프플로우를 측정한 결과이다.

Fig. 4.3에서 슬럼프플로우는 실험조건에 관계없이 배합설계기준인 50 ± 5 cm를 만족하였다. 또한 잔골재의 종류에 따라 살펴보면 강모래, 바다모래, 부순모래 순으로 슬럼프플로우가 크게 나타났고, 부순모래 혼입률이 증가할수록 슬럼프플로우가 감소하는 것으로 나타났는데, 이것은 골재의 형상과 골재의 표면의 거친 정도와 흡수율의 차이 때문이라고 판단된다. 따라서 부순모래를 사용한 수중불분리성 콘크리트는 강모래, 바다모래를 사용한 경우에 비해 상대적으로 입형이 불량하므로 동일한 슬럼프를 얻기 위해서는 더 많은 양의 단위수량을 요구할 것으로 사료된다.

강모래에 바다모래를, 강모래와 바다모래에 부순모래를 혼입할 경우 혼입률 40%에서 슬럼프플로우가 가장 크게 나타났다.

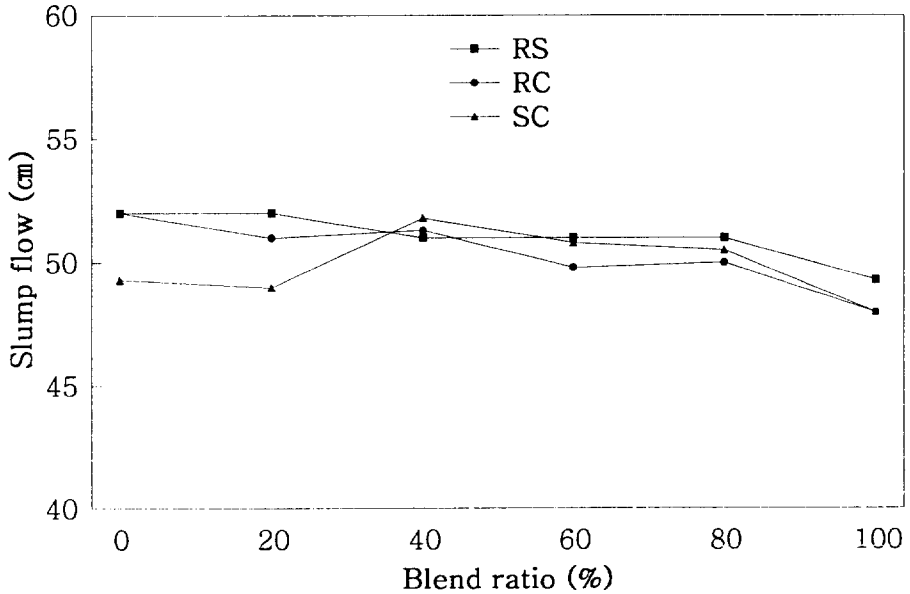


Fig. 4.3 Slump flow as to variation of blend ratio

4.1.3 공기량

Fig. 4.4는 강모래에 바다모래를, 강모래와 바다모래에 각각 부순모래 혼입률을 변화시킨 굳지않은 수중불분리성 콘크리트의 공기량을 측정한 결과이다.

Fig. 4.4에서 강모래에 바다모래를, 강모래와 바다모래에 각각 부순모래를 혼입한 경우에 혼입률 변화에 관계없이 공기량은 배합설계기준인 4%이하를 모두 만족하였고, 강모래에 바다모래를 혼입할 경우에는 혼입률 40%에서 가장 낮게 나타났고, 강모래와 바다모래에 부순모래를 혼입할 경우 부순모래 혼입률 40%에서 가장 높게 나타났다.

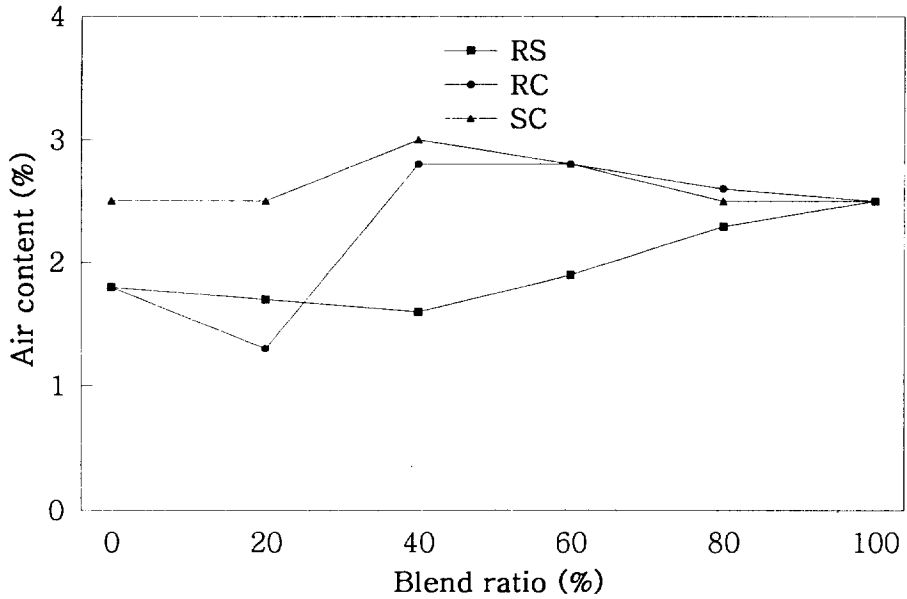


Fig. 4.4 Air contents as to variation of blend ratio

4.2 경화된 수중불분리성 콘크리트의 특성

Table 4.2와 Table 4.3은 잔골재로 강모래, 바다모래, 부순모래를 사용하고, 강모래에 바다모래를, 강모래와 바다모래에 각각 부순모래를 0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%로 혼입률을 변화시켜 담수와 해수에서 각각 제작·양생한 재령 7일, 재령 28일에 경화된 수중불분리성 콘크리트의 단위중량과 압축강도를 측정한 결과이다.

Table 4.2 Results of hardened concrete (7days)

Symbol	Unit weight (kg/m ³)		Compressive strength (kgf/cm ²)	
	Fresh water	Sea water	Fresh water	Sea water
RS- 0	2267	2262	238	214
RS- 20	2286	2276	203	186
RS- 40	2289	2283	235	201
RS- 60	2297	2284	221	190
RS- 80	2303	2291	205	178
RS-100	2287	2273	208	188
RC- 0	2267	2262	238	214
RC- 20	2271	2266	222	197
RC- 40	2275	2275	225	206
RC- 60	2276	2281	196	170
RC- 80	2282	2283	211	195
RC-100	2324	2301	208	198
SC- 0	2287	2273	208	188
SC- 20	2291	2281	198	185
SC- 40	2294	2288	237	204
SC- 60	2302	2289	223	191
SC- 80	2308	2296	209	180
SC-100	2324	2301	208	198

Table 4.3 Results of hardened concrete (28days)

Symbol	Unit weight (kg/m ³)		Compressive strength (kgf/cm ²)	
	Fresh water	Sea water	Fresh water	Sea water
RS- 0	2273	2264	289	254
RS- 20	2274	2273	273	223
RS- 40	2292	2282	281	240
RS- 60	2281	2285	262	219
RS- 80	2283	2286	246	235
RS-100	2295	2274	234	217
RC- 0	2273	2264	289	254
RC- 20	2278	2285	278	219
RC- 40	2294	2289	285	248
RC- 60	2301	2289	283	220
RC- 80	2302	2303	259	225
RC-100	2327	2314	244	231
SC- 0	2295	2274	234	217
SC- 20	2302	2288	272	215
SC- 40	2303	2289	280	247
SC- 60	2308	2293	264	217
SC- 80	2308	2298	245	239
SC-100	2327	2314	244	231

4.2.1 단위중량

Fig. 4.5는 잔골재로 강모래, 바다모래, 부순모래를 사용하고, 강모래에 바다모래를 강모래와 바다모래에 각각 부순모래 혼입률을 변화시켜 담수와 해수에서 각각 제작·양생한 재령 7일의 수중불분리성 콘크리트의 단위중량을 측정된 결과이며, Fig 4.6은 재령 28일의 수중불분리성 콘크리트의 단위중량을 측정된 결과이다.

Fig. 4.5, Fig. 4.6에서 제작·양생조건 및 재령에 관계없이 부순모래 혼입률이 증가할수록 단위중량이 크게 나타났는데, 이것은 부순모래의 비중이 강모래나 바다 모래의 경우보다 상대적으로 크기 때문으로 사료된다. 강모래에 부순모래를 혼입한 경우에는 전체적으로 혼입률이 대체로 증가하는 경향을 나타내고 있다. 잔골재의 종류 따라 살펴보면 단위중량의 크기는 부순모래, 바다모래, 강모래의 순으로 나타났다. 그리고 전체적으로 보통콘크리트의 단위중량인 2350kg/cm³보다 가볍게 나타났는데, 이것은 다짐 없이 수중에서 제작하였기 때문으로 사료된다.

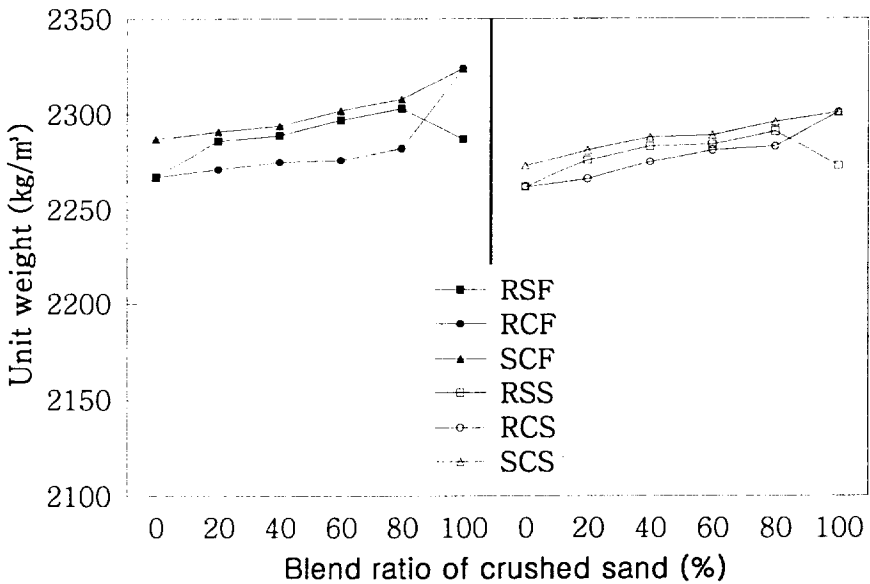


Fig. 4.5 Unit weight as to variation of blend ratio (7 days)

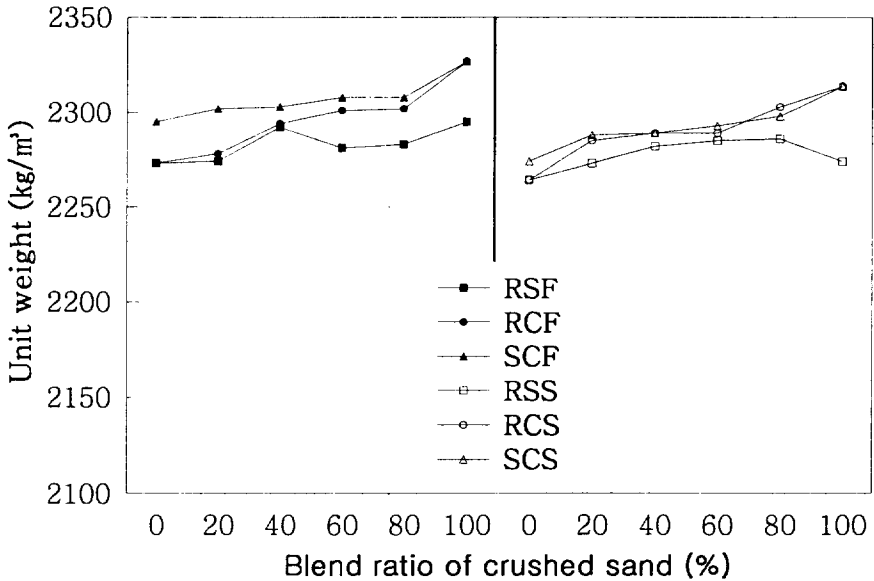


Fig. 4.6 Unit weight as to variation of blend ratio (28 days)

4.2.2 압축강도

Fig. 4.7은 잔골재로 강모래, 바다모래, 부순모래를 사용하고, 강모래에 바다모래를, 강모래와 바다모래에 각각 부순모래 혼입률을 변화시켜 담수와 해수에서 각각 제작·양생한 재령 7일의 수중불분리성 콘크리트의 압축강도를 측정한 결과이며, Fig 4.8은 재령 28일의 압축강도를 측정한 결과이다.

Fig. 4.7, Fig. 4.8에서 잔골재의 종류에 따라 살펴보면 제작·양생 조건과 재령에 관계없이 압축강도의 크기는 강모래, 부순모래, 바다모래 순으로 나타났다. 잔골재로 강모래를 사용한 경우(부순모래 혼입률 0%)를 제외하고는 잔골재의 종류에 관계없이 부순모래 혼입률 40%에서 가장 큰 압축강도가 나타났다. 따라서 강모래에 바다모래를, 강모래나 바다모래에 부순모래를 혼입한다면 최적 바다모래, 부순모래 혼입률은 40%로 볼 수 있겠다.

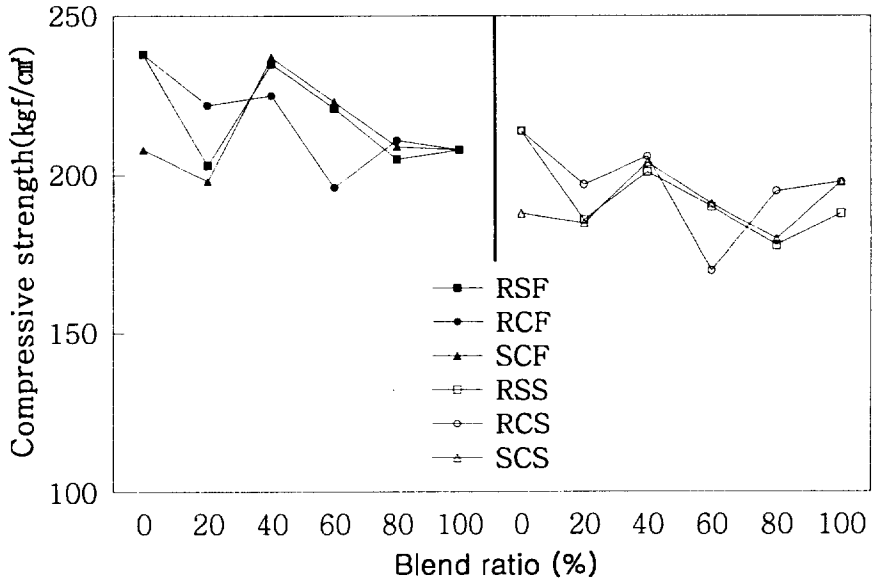


Fig. 4.7 Compressive strength as to variation of blend ratio (7 days)

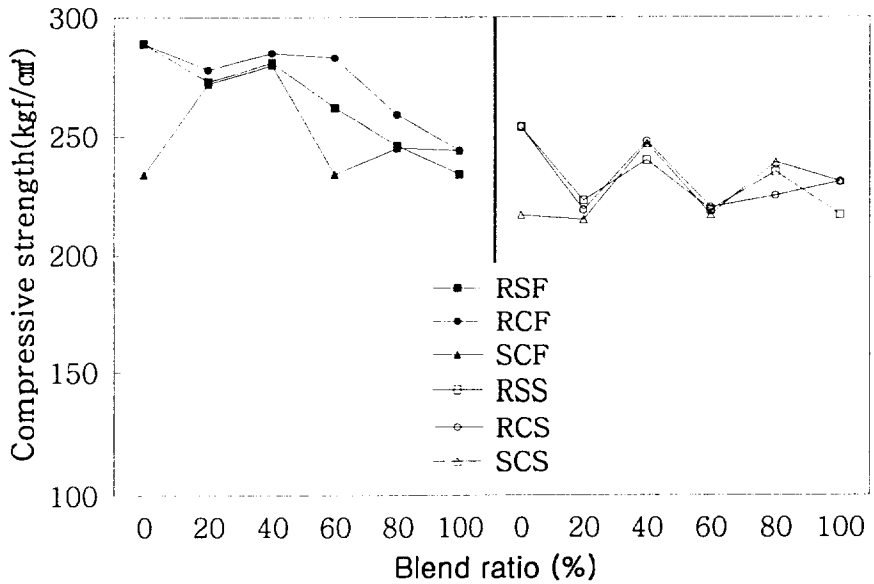


Fig. 4.8 Compressive strength as to variation of blend ratio (28days)

4.3 실험조건에 따른 비교, 검토

각각의 실험조건에 따른 비교·검토를하기 위해 강모래에 부순모래를 혼입한 경우에 대한 바다모래에 부순모래를 혼입한 경우와 강모래에 바다모래를 혼입한 경우의 실험결과에 대한 비를 나타내어 비교·검토 하였다.

Fig. 4.9는 강모래에 부순모래를 혼입한 경우를 중심으로 pH에 대한 비를 나타낸 결과이며, Fig. 4.10은 현탁물질량에 대한 비, Fig. 4.11은 슬럼프 플로우에 대한 비, Fig. 4.12는 공기량에 대한 비, Fig. 4.13은 재령 7일의 단위중량에 대한 비, Fig. 4.14는 재령 28일의 단위중량에 대한 비, Fig. 4.15는 재령 7일의 압축강도에 대한 비, Fig. 4.16은 재령 28일의 압축강도에 대한 비를 나타낸 결과이다.

Fig. 4.9에서 강모래에 바다모래를 혼입할 경우에 pH가 가장 크게 나타났고, 바다모래에 부순모래를 혼입할 경우는 강모래에 부순모래를 혼입할 경우와 비슷하게 나타났다.

Fig. 4.10에서 현탁물질량에 대한 비는 pH와 비슷한 경향을 나타내고 있으며, 본 실험에서는 잔골재로 바다모래를 사용할 경우가 부순모래를 사용할 경우보다 약 1.8배만큼 크게 나타났다. 또한 바다모래에 부순모래를 혼입할 경우가 미소하지만 더 크게 나타났다.

Fig. 4.11에서 슬럼프플로우는 40%일 경우를 제외하고는 강모래에 바다모래를 혼입한 경우가 바다모래에 부순모래를 혼입한 경우보다 더 크게 나타났다.

Fig. 4.12에서 공기량은 혼입률 20%에서 대체로 크게 나타났고, 강모래에 부순모래를 혼입할 경우보다 강모래에 바다모래를 혼입할 경우는 30%정도 더 크게 나타났고, 바다모래에 부순모래를 혼입할 경우는 100%정도 더 크게 나타났다.

Fig. 4.13과 Fig. 4.14에서 단위중량은 제작·양생조건에 관계없이 전체적으로 바다모래에 부순모래를 혼입할 경우가 강모래에 바다모래를 혼입할 경우보다 단위중량의 비가 더 크게 나타났다.

Fig. 4.15에서 재령 7일의 압축강도는 제작·양생조건에 관계없이 혼입률

60%에서 강모래에 부순모래를 사용한 경우보다 더 높은 압축강도가 나타났다.

Fig. 4.16에서 재령 28일의 압축강도가 담수에서 제작·양생할 경우에는 전체적으로 강모래에 부순모래를 혼입할 경우보다 낮게 나타났고, 해수에서 제작·양생할 경우에는 혼입률 20%, 80%일 경우를 제외하고는 담수에서와 같은 결과로 나타났다.

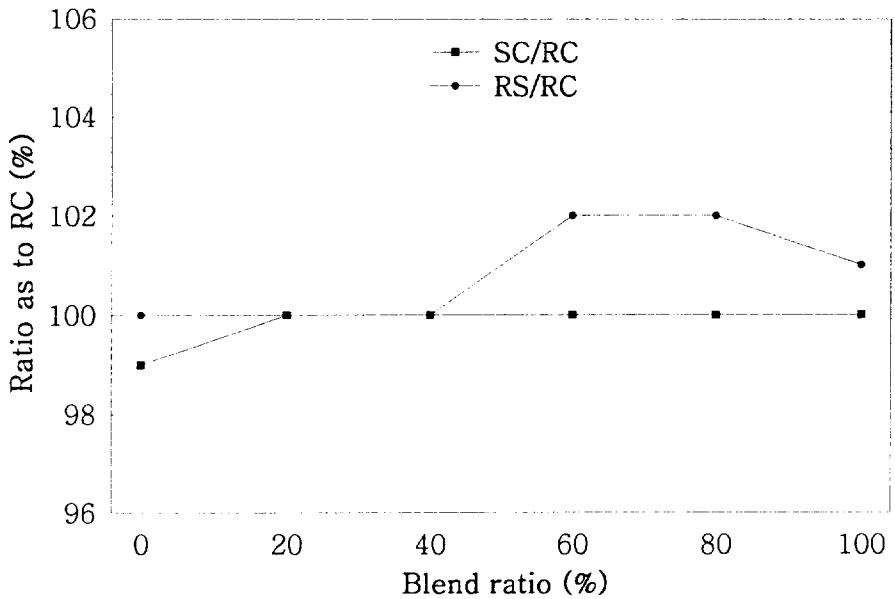


Fig. 4.9 Ratio of pH values as to RC

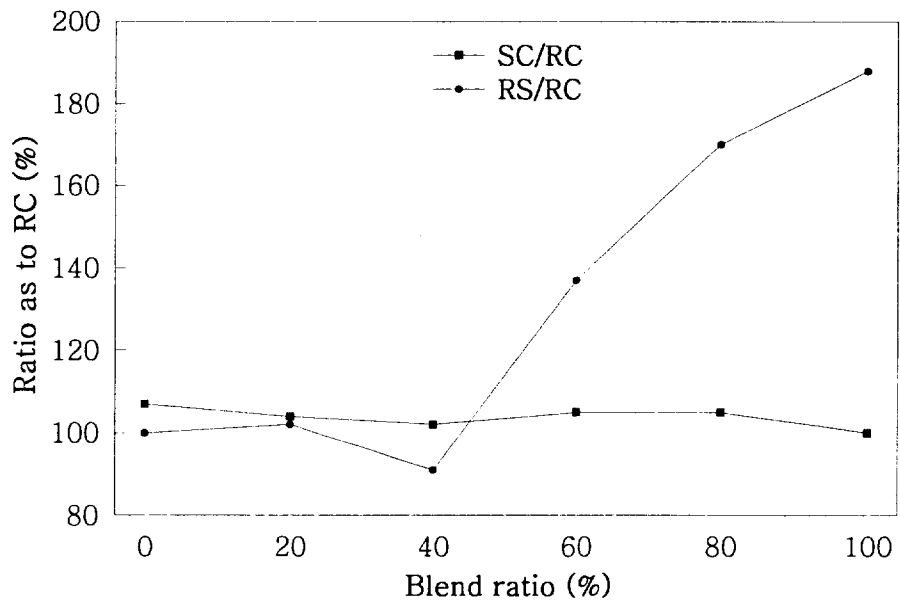


Fig. 4.10 Ratio of suspension values as to RC

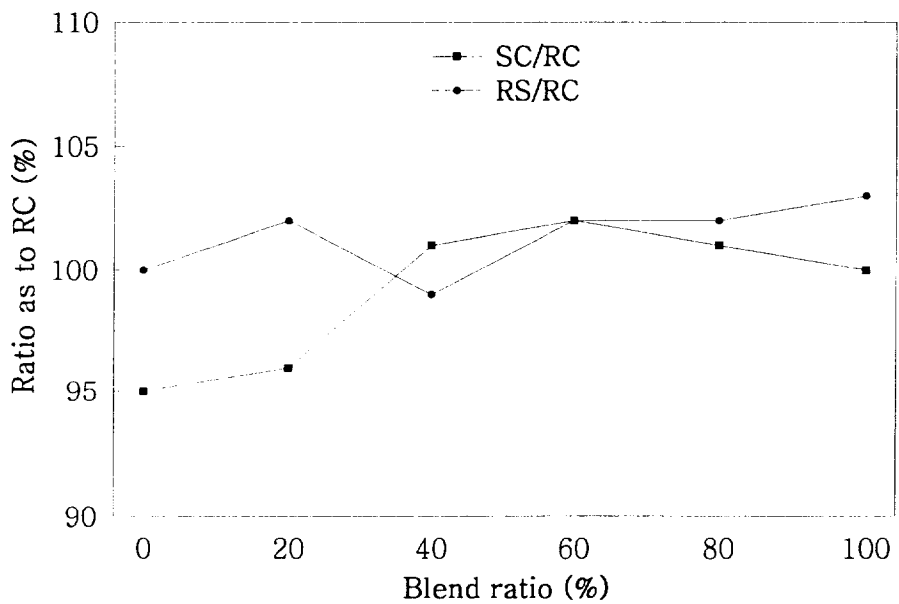


Fig. 4.11 Ratio of slump flow values as to RC

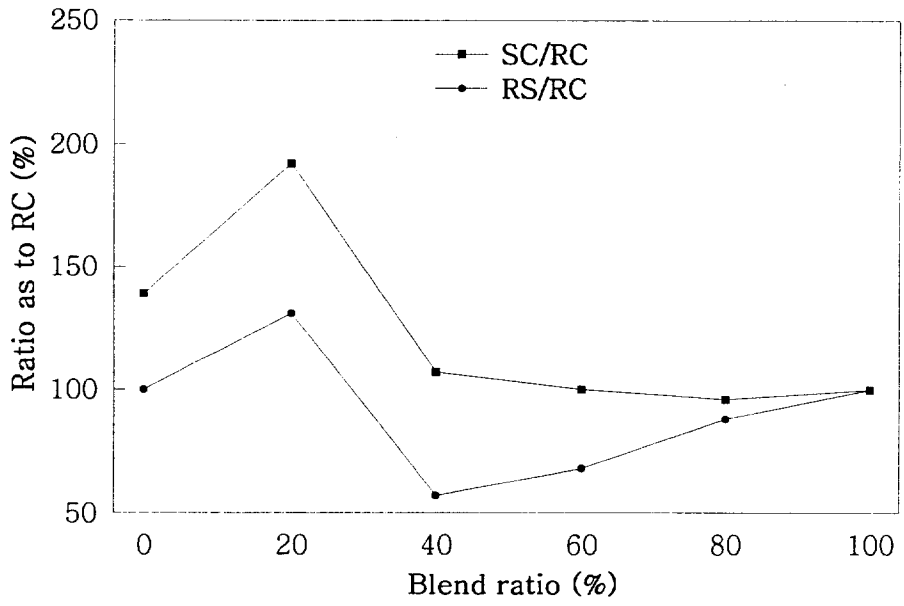


Fig. 4.12 Ratio of air content values as to RC

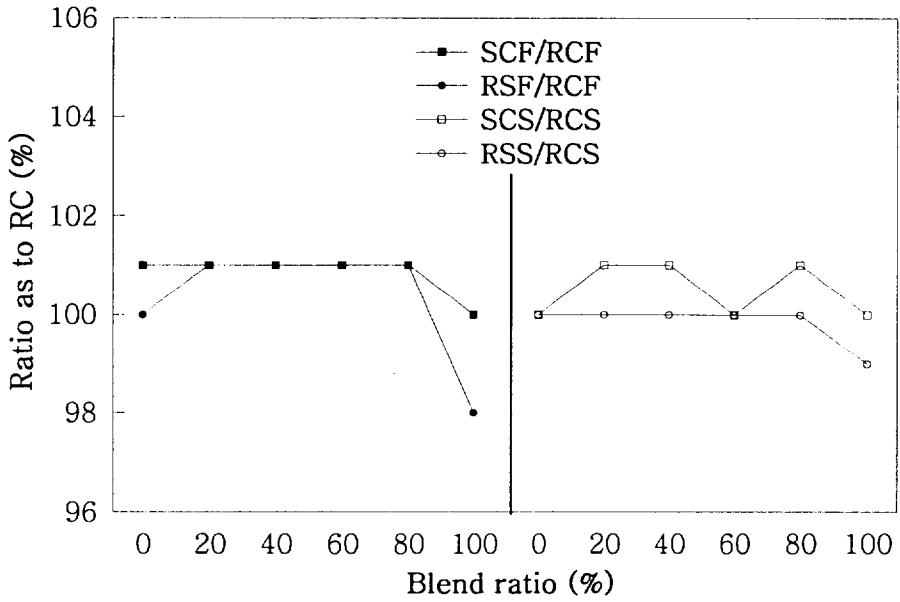


Fig. 4.13 Ratio unit weight values ratio as to RC (7days)

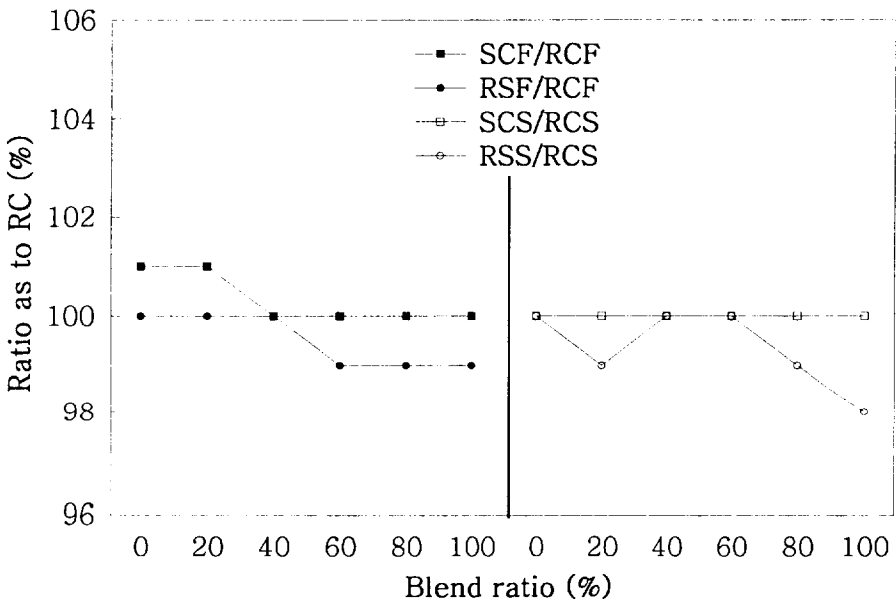


Fig. 4.14 Ratio unit weight values ratio as to RC (28days)

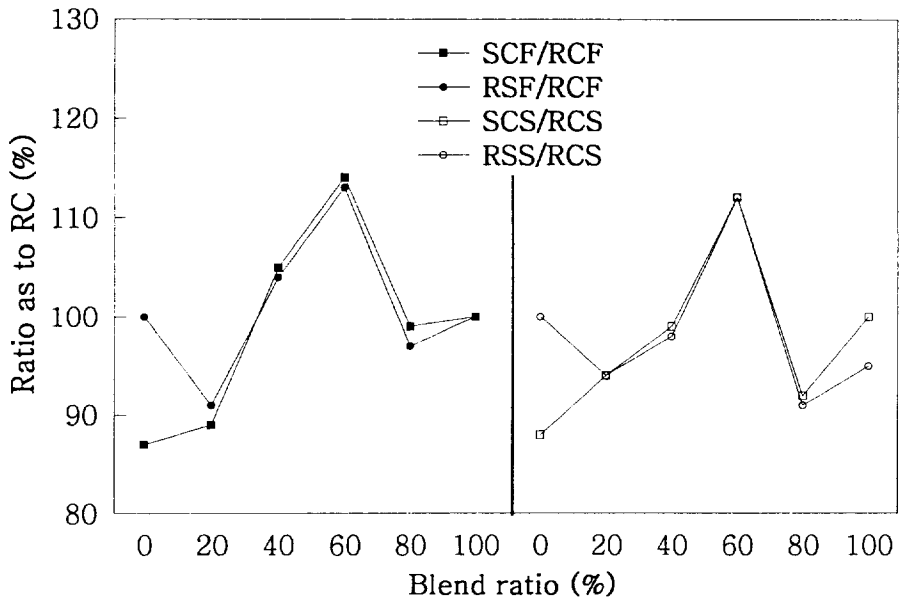


Fig. 4.15 Ratio of compressive strength values as to RC (7days)

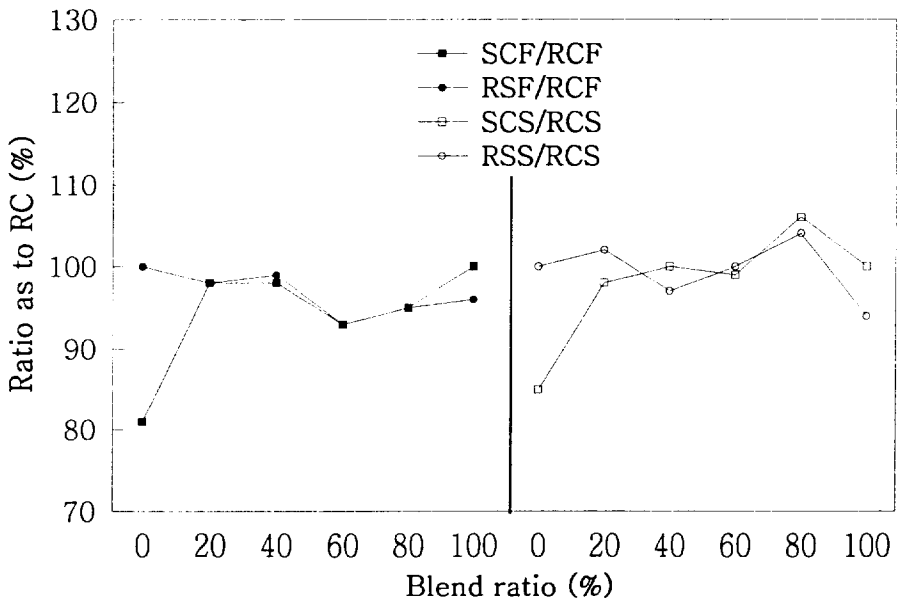


Fig. 4.16 Ratio of compressive strength values as to RC (28days)

4.4 제작·양생조건이 수중불분리성 콘크리트에 미치는 영향

수중불분리성 콘크리트는 다짐 없이 수중에 치게되므로 압축강도의 저하뿐만 아니라 수화반응에도 영향을 미칠 것으로 생각된다.

또한 해수에서 수중불분리성 콘크리트를 치게 될 경우 해수에 포함된 염류 중에 황산마그네슘($MgSO_4$)은 콘크리트의 수화시 발생하는 수산화칼슘($Ca(OH)_2$)과 반응하게 되어 에트링자이트의 생성에 의해 콘크리트가 팽창하여 열화를 촉진시켜 콘크리트의 강도와 내구성을 저하시킨다.

따라서, 본 연구에서는 잔골재의 종류나 혼입률을 변화시켜 제작·양생한 수중불분리성 콘크리트의 특성에 해수가 미치는 영향을 살펴보기위해 재령 7일과 28일의 해수/담수 압축강도비를 Table 4.4와 같이 다시 정리하였다.

Table 4.4에서 강도비(strength ratio)는 담수에서 제작·양생한 수중불분리성 콘크리트의 압축강도에 대한 해수에서 제작·양생한 수중불분리성 콘크리트의 압축강도비를 나타낸 것으로, 본 연구에서는 해수/담수강도비라고 표현하였다.

재령 7일의 경우 해수/담수강도비의 평균은 90%로 나타났고, 재령 28일의 해수/담수강도비의 평균은 87%로 나타났는데, 이것은 해수에 의해 콘크리트가 열화 되기 때문으로 생각된다. 또한 재령 28일의 경우가 재령 7일의 경우보다 해수/담수강도비가 더 작게 나타났는데, 이것은 재령이 오래 될 수록 해수의 지속적인 작용으로 콘크리트의 열화가 계속 진행되고 있기 때문으로 생각된다.

따라서, 해양에서 적용될 수중불분리성 콘크리트의 배합설계를 수행할 경우에는 담수에서 보다 높은 할증계수를 적용하여야 할 것으로 생각된다.

Table 4.4 Results of strength ratio

Symbol	Strength ratio (%)	
	7days	28day
RS- 0	90	88
RS- 20	92	82
RS- 40	86	85
RS- 60	86	84
RS- 80	87	96
RS-100	90	93
RC- 0	90	88
RC- 20	89	79
RC- 40	92	87
RC- 60	87	78
RC- 80	92	87
RC-100	95	95
SC- 0	90	93
SC- 20	93	79
SC- 40	86	88
SC- 60	86	82
SC- 80	86	98
SC-100	95	95
Average	90	87

5. 결론

본 연구에서는 강모래, 바다모래, 부순모래의 혼입률 변화에 따른 수중불분리성 콘크리트의 품질변화를 측정하고, 실험조건의 변화에 따른 결과를 비교·분석하기 위해서 강모래에 바다모래를, 강모래와 바다모래에 각각 부순모래의 혼입률을 0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%로 혼입률을 변화시켜 실험한 결과 다음과 같은 결론을 알 수 있었다.

(1) 재료분리저항성을 나타내는 pH와 현탁물질량을 측정한 결과 한국콘크리트학회 기준치를 모두 만족하였고, 부순모래 혼입률이 증가할수록 pH와 현탁물질량은 감소하는 경향이 나타났는데, 이것은 부순모래의 흡수율이 높기 때문에 상대적으로 단위수량이 감소하여 물의 셋김 작용에 대한 저항성이 커지기 때문이라고 사료된다. 그리고 강모래에 바다모래를 혼합할 경우 혼입률 40%를 전후하여 약간 증가하는 경향을 보이고 있다. 강모래에 바다모래를 혼입할 경우가 pH와 현탁물질량이 가장 크게 나타났고, 바다모래에 부순모래를 혼입할 경우는 강모래에 부순모래를 혼입할 경우와 비슷하게 나타났다.

(2) 수중불분리성 콘크리트의 유동성을 평가할 수 있는 슬럼프플로우를 측정한 결과 부순모래 혼입률 변화에 관계없이 배합설계기준인 $50 \pm 5\text{cm}$ 를 모두 만족하였고, 잔골재의 종류에 따른 실험결과를 살펴보면 강모래, 바다모래, 부순모래 순으로 슬럼프플로우가 크게 나타났으며, 부순모래를 혼입률이 증가할수록 슬럼프플로우가 감소하는 것으로 나타났는데, 이것은 골재의 형상과 골재의 표면의 거친 정도와 흡수율의 차이 때문으로 사료된다. 따라서 부순모래를 사용한 수중불분리성 콘크리트는 강모래, 바다모래를 사용한 콘크리트에 비해 일반적으로 입형이 불량하므로 동일한 슬럼프를 얻기 위해서는 더 많은 양의 단위수량을 요구할 것으로 사료된다.

강모래에 바다모래를, 강모래와 바다모래에 부순모래를 혼입할 경우 혼입률 40%에서 슬럼프플로우가 가장 크게 나타났다.

(3) 공기량을 측정한 결과 강모래에 바다모래를, 강모래와 바다모래에 각각 부순모래 혼입할 경우 혼입률 변화에 관계없이 배합설계기준인 4%이하를 모두 만족하였고, 부순모래 혼입률 40%에서 가장 높게 나타났으며, 강모래에 바다모래를 혼입할 경우에는 혼입률 40%에서 가장 낮게 나타났다.

강모래에 부순모래를 혼합한 경우에 대한 공기량의 변화비는 혼입률 20%에서 대체로 크게 나타났고, 강모래에 부순모래를 혼입할 경우보다 강모래에 바다모래를 혼입할 경우는 30%정도 더 크게 나타났고, 바다모래에 부순모래를 혼입할 경우는 100%정도 더 크게 나타났다.

(4) 단위중량은 제작·양생조건 및 재령에 관계없이 부순모래 혼입률이 증가할수록 단위중량이 크게 나타났는데, 이것은 부순모래의 비중이 강모래나 바다모래의 경우보다 상대적으로 크기 때문으로 사료된다. 강모래에 부순모래를 혼입한 경우에는 혼입률이 증가할수록 전체적으로 증가하는 경향을 나타내고 있다.

잔골재의 종류 따라 살펴보면 단위중량의 크기는 부순모래, 바다모래, 강모래의 순으로 나타났다. 그리고 전체적으로 보통콘크리트의 단위중량인 $2350\text{kg}/\text{cm}^3$ 보다 가볍게 나타났는데, 이것은 다짐 없이 수중에서 제작하였기 때문으로 사료된다.

(5) 압축강도를 잔골재의 종류에 따라 살펴보면 제작·양생 조건과 재령에 관계없이 그 크기는 강모래, 부순모래, 바다모래 순으로 나타났다.

잔골재로 강모래만 사용한 경우를 제외하고는 잔골재의 종류에 관계없이 부순모래 혼입률 40%에서 가장 큰 압축강도가 나타났다. 따라서 강모래에 바다모래를, 강모래나 바다모래에 부순모래를 혼입한다면 최적 바다모래, 부순모래 혼입률은 40%로 볼 수 있겠다.

(6) 해수/담수강도비는 재령 7일의 경우 평균은 90%로 나타났고, 재령 28일의 경우에는 87%로 나타났는데, 이것은 해수에 의해 콘크리트가 열화

가 진행되기 때문으로 생각된다. 또한 재령 28일의 경우가 재령 7일의 경우보다 해수/담수강도비가 더 작게 나타났는데, 이것은 재령이 오래 될 수록 해수의 지속적인 작용으로 콘크리트의 열화가 계속 진행되고 있기 때문으로 생각된다. 따라서, 해양에서 적용될 수중불분리성 콘크리트의 배합설계를 수행할 경우에는 담수에서 보다 높은 활중계수를 적용해야 할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. 김명식, “수중비분리콘크리트의 특성에 대한 기초적 연구”, 한국농공학회지, 제38권, 제6호, pp. 75-82, 1996.
2. 김명식 외 3인, “W/C변화에 따른 수중불분리 콘크리트의 기초특성에 관한 실험적 연구”, 한국콘크리트학회 논문집, 제11권, 제4호, pp. 21-30, 1999. 8.
3. 백동일, “해사를 사용한 수중불분리콘크리트의 특성에 관한 기초적 연구, 부경대학교 산업대학원, 1998. 2.
4. 어영선, “수중불분리콘크리트의 최적 물-시멘트비에 관한 실험적 연구”, 부경대학교 산업대학원, 1998. 8.
5. 최의식, “해사를 사용한 수중불분리콘크리트의 강도발현에 관한 기초적 연구”, 부경대학교 산업대학원, 1998. 8.
6. 김광민, “해사 혼합률 변화에 따른 수중불분리콘크리트의 특성에 관한 실험적 연구”, 부경대학교 산업대학원, 1999. 2.
7. 김기동, “수중불분리콘크리트의 부착강도특성에 관한 기초적 연구”, 부경대학교 산업대학원, 1999. 8.
8. 이상명, “제작환경에 따른 수중불분리성 콘크리트의 특성에 관한 실험적 연구”, 부경대학교 일반대학원, 2000. 3.
9. 윤재범, “배합조건과 양생수에 따른 수중불분리성 콘크리트의 특성에 관한 연구”, 부경대학교 일반대학원, 2000. 3.
10. 문한영, “콘크리트용 수중불분리성 혼화제 품질기준”, 대한토목학회지, 제45권, 제3호, pp. 71-77, 1997.1.
11. 대한토목학회, “콘크리트용 유동화제 품질기준”, 대한토목학회지, 제45권 제3호, pp. 93-97, 1997.3.
12. 한국콘크리트학회, “최신콘크리트공학” pp. 109-170, 1997. 10.
13. 대한건축학회, “고강도-고성능 콘크리트 제조·시공 및 설계”, 1996. 4.
14. 문한영 외 3인, “고로슬래그미분말을 활용한 수중불분리성 콘크리트”, 한국콘크리트학회 1998년도 가을 학술발표회 논문집, 제10권, 제2호, pp. 83-86, 1998.

15. 中川良隆 , “水中コンクリート”, 日本土木學會論文集, Vol.31, No.3, pp.67-72, 1993. 3.
16. 財團法人沿岸開發技術研究センターほか, 水中不分離性コンクリート・マニュアル(設計・施工), 山海堂, pp.41-52, 1990.
17. 關博, “日本土木學會, 水中不分離性 コンクリート設計施工指針(案) のアウトラインセメント・コンクリート”, No.541, pp.49-95, 1992.
18. Takeshi Ohtomo, Yasunori Matsuoka, Yoshitaka Nakagawa, and Jun Nakahira “Influence of Materials on the Action of Admixtures in Antiwashout Underwater Concrete”, ACI Materials Journal, Vol.92, No.3, pp.315-320, May-June 1995.
19. Ksmal Henri Khayat, “Effects of Antiwashout Admixtures on Fresh Concrete Properties”, ACI Materials Journal, Vol.92, No.2, pp.164-171, March-April 1995.
20. Nobuaki Otsuki, Makoto Hisada, Shigeyoshi Nagataki, and Toshiro Kamada, “An Experimental Study on the Fluidity of Antiwashout Underwater Concrete”, ACI Materials Journal, Vol.93, No.1, pp.20-25, January-February 1996.
21. 한국콘크리트학회, “콘크리트표준시방서 해설집”, 기문당, pp.466~480, 2000. 5.
22. 한국콘크리트학회, “부순모래 및 부순모래 콘크리트”, 기문당, pp.47~61, 1998. 6.

감사의 글

어느 듯 시간이 흘러 학교 생활을 마치고 졸업의 문턱 앞에 다가왔습니다. 먼저 이 논문을 완성하기까지 미흡한 저에게 너무나도 자상하게 지도해 주신 김명식 교수님께 무한한 감사를 드립니다. 또한 미흡한 저의 논문을 심사하며 바로 잡아주신 이환우 교수님, 이영대 교수님께도 깊은 감사를 드립니다. 대학원에서 공부할 수 있도록 기초를 잘 닦아주신 김상용 교수님, 김종수 교수님, 손인식 교수님, 이동욱 교수님, 이종출 교수님, 장희석 교수님, 정진호 교수님, 이종섭 교수님, 국승규 교수님, 정두희 교수님, 이상호 교수님께도 깊은 감사를 드립니다.

그리고 논문실험에 많은 조언을 해주셨던 백동일 선배님, 윤재범 선배님, 이상명 선배님과 여러 선배님께 깊은 감사를 드립니다. 본 논문이 있기까지 2년간 실험실 생활을 같이 하면서 도움을 많이 주었던 친구 정병훈, 정해동과 콘크리트 연구회의 진송규, 조창만, 이종복, 강성훈, 박성호, 배원만, 권영훈, 송언철, 김태영, 허민식, 김명준, 김선환, 양승필을 비롯한 여러 후배님께 너무나도 깊은 고마움을 전합니다. 그리고 같이 웃고, 또 고생했던 김대성을 비롯한 동기 여러분들도 많은 힘이 되어 고마움을 전합니다.

또한 본 논문을 완성할 수 있도록 직장생활을 배려하여 주신 윤홍수 이사님, 성삼현 부장님 그리고 직장 선배님께도 깊은 감사를 드립니다.

어렵고 힘들 때 도와주고 힘이 되어준 친구 문상호, 정재혁, 조정대, 배동렬, 신종호, 배상범, 이민희, 김광용, 진성민에게 감사를 드립니다.

항상 옆에서 힘들 때 도와주고, 옆에서 챙겨준 동생 세진의 사랑에 대해 깊은 감사를 드립니다.

끝으로 오늘이 있기까지 낳아 주셨고 노심초사 공들여 키워주시고 말씀은 안하시지만 제가 하는일에 대해 믿음과 사랑으로 보살펴주시고, 용기를 주시며 조금이라도 더 힘이 되고자 하셨던 사랑하는 아버지, 어머니의 사랑에 깊은 감사드리며, 그 은혜에 조금이나마 보답코져 이 논문을 바칩니다.